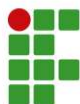


**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
DEPARTAMENTO DAS ÁREAS ACADÊMICAS IV
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

BRUNO PORTO SILVA

**ESTUDO DE CASO DA EXECUÇÃO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA DE 60KW
DE POTÊNCIA EM ZONA RURAL NA MODALIDADE AUTOCONSUMO
REMOTO**

**GOIÂNIA
2026**



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Bruno Porto Silva

Matrícula: 20211011060040

Título do Trabalho: Estudo de Caso da Execução de uma Usina Fotovoltaica de 60KW de Potência em Zona Rural na Modalidade Autoconsumo Remoto

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 03/03/2026.

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

BRUNO PORTO SILVA

**ESTUDO DE CASO DA EXECUÇÃO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA DE 60KW
DE POTÊNCIA EM ZONA RURAL NA MODALIDADE AUTOCONSUMO
REMOTO**

Trabalho de Conclusão de Curso, submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Cardoso

**GOIÂNIA
2026**

S586e Silva, Bruno Porto.

Estudo de caso da execução de uma usina fotovoltaica de 60kW de potência em zona rural na modalidade autoconsumo remoto / Bruno Porto Silva. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2026.
123f.

Orientação: Prof. Dr. Marcos Antônio Cardoso.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Departamento de Áreas Acadêmicas IV, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Energia solar fotovoltaica. 2. Geração distribuída. I. Cardoso, Marcos Antônio (orientação). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. III. Título.

CDD 621.47

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Lana Cristina Dias Oliveira CRB1/ 2.631
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **Estudo de Caso da Execução de uma Usina Fotovoltaica de 60 kW de Potência em Zona Rural na Modalidade Autoconsumo Remoto**, sob orientação de Marcos Antonio Cardoso de Lima, apresentado pelo aluno **Bruno Porto Silva (20211011060040)** do Curso **Bacharelado em Engenharia Elétrica (Câmpus Goiânia)**. Os trabalhos foram iniciados às **19:00** do dia **28/01/2026** pelo Professor presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

- **Marcos Antonio Cardoso de Lima** (Presidente)
- **Joao Batista Jose Pereira** (Examinador Interno)
- **Paulo Sergio Zanin Junior** (Examinador Interno)
- **Hilberto Santana** (Examinador Externo)

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo do Trabalho de Conclusão de Curso, passou à arguição do candidato. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pelo aluno, tendo sido atribuído o seguinte resultado:

☒ Aprovado

☐ Reprovado

Nota : 9,3

Observação / Apreciações:

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu **Marcos Antonio Cardoso de Lima** lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Paulo Sergio Zanin Junior**, em **28/01/2026 21:31:38** com chave **dff86f74fca911f0b313005056a537a4**.
- **Joao Batista Jose Pereira**, em **29/01/2026 09:09:38** com chave **62143ce8fd0b11f09018005056a537a4**.
- **Hilberto Santana**, em **29/01/2026 09:00:26** com chave **1968b15afd0a11f096fd005056a537a4**.
- **Marcos Antonio Cardoso de Lima**, em **28/01/2026 21:17:26** com chave **e4373068fca711f0ae86005056a537a4**.

Este documento foi emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.ifg.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir.

Tipo de Documento: Ata de Projeto Final

Data da Emissão: 30/01/2026

Código de Autenticação: ef5e3d



RESUMO

A energia solar fotovoltaica tem se consolidado como uma alternativa estratégica de geração de energia no Brasil, sobretudo em regiões rurais com grande disponibilidade de espaço e alta incidência solar. A regulamentação nacional, por meio de resoluções normativas e da Lei nº 14.300/2022, viabilizou modelos como o autoconsumo remoto, que permite a geração de energia em um local e o uso em unidades consumidoras distintas, desde que sob mesma titularidade. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta o estudo de caso da execução de uma usina fotovoltaica com 60 kW de potência instalada, localizada em uma zona rural no estado de Goiás, e conectada à rede na modalidade de autoconsumo remoto. Com base na análise técnica do sistema implantado e nas informações de desempenho energético obtidas em campo, foi possível demonstrar a viabilidade técnica, econômica e normativa da solução adotada, destacando-se os ganhos em eficiência energética e redução de custos com energia elétrica para o titular da unidade geradora.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica. Geração distribuída. Autoconsumo remoto.

ABSTRACT

Photovoltaic solar energy has emerged as a strategic alternative for electricity generation in Brazil, particularly in rural areas with ample space availability and high solar irradiance. National regulations, through normative resolutions and Law No. 14,300/2022, have enabled models such as remote self-consumption, which allows energy to be generated in one location and consumed in other units under the same ownership. In this context, this study presents a case analysis of the implementation of a photovoltaic power plant with an installed capacity of 60 kW, located in a rural area in the state of Goiás, and connected to the grid under the remote self-consumption compensation scheme. Based on technical evaluation of the implemented system and on-site energy performance data, the feasibility of the adopted solution was demonstrated from technical, economic, and regulatory perspectives. The results highlight significant improvements in energy efficiency and cost reduction in electricity expenses for the system owner.

Key words: Photovoltaic solar energy. Distributed generation. Remote self-consumption.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	12
LISTA DE SÍMBOLOS	13
1 INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Justificativa.....	16
1.2 Objetivos Gerais	17
1.3 Objetivos Específicos	17
1.4 Metodologia.....	18
1.5 Estrutura do Trabalho	19
2 SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	20
2.1 Energia Solar Fotovoltaica	20
2.2 Efeito Fotovoltaico	22
2.3 Radiação Solar no Brasil	22
2.4 Tipos de Sistemas	29
2.5 Legislação e Normas Aplicáveis	34
3 COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO (SFV).....	37
3.1 Módulos Fotovoltaicos	37
3.2 Inversores	44
3.3 Estruturas de Suporte.....	49
3.4 Cabeamento e Conectores	52
3.5 Dispositivos de Proteção e Seccionamento	53
3.6 Aterramento	58
3.7 Sistemas de Monitoramento	59
3.8 Bancos de Baterias.....	60
3.9 Controladores de Carga	60
4 DIMENSIONAMENTO E PROJETO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	62
4.1 Dimensionamento de um SFVCR	62
4.2 Projeto Elétrico de um SFVCR	66
5 DIMENSIONAMENTO DA UFV MORRO REDONDO.....	68
5.1 Levantamento de Dados e Avaliação Técnica Preliminar.....	69
5.2 Dimensionamento com Software Solergo	72
5.3 Dimensionamento Manual.....	89

6	SOLICITAÇÕES TÉCNICAS JUNTO À CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA	92
6.1	Análise de Viabilidade Técnica (AVT)	92
6.2	Carta de Orçamento	93
6.3	Ligação Nova.....	94
6.4	Solicitação de Acesso UFV	97
7	EXECUÇÃO DA UFV MORRO REDONDO	102
7.1	Execução da Usina Fotovoltaica	102
7.2	Execução da Subestação	111
7.3	Execução da Extensão de Rede	114
7.4	Análise dos Resultados de Geração da Usina.....	115
7.5	Considerações Finais	119
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrutura de consolidação da projeção do consumo final de energia.....	8
Figura 2. Produção de energias renováveis no Brasil em 2022 e 2023.	9
Figura 3. Evolução da demanda residencial elétrica e energética.	10
Figura 4. Evolução do consumo de eletricidade e área do setor comercial.	10
Figura 5. Consumo energético e valor adicionado das indústrias no Brasil.	11
Figura 6. Matriz elétrica mundial e nacional.	11
Figura 7. Energia Solar no Mundo – Potência Instalada Acumulada (GW) até 2023.....	12
Figura 8. Energia Solar no Brasil - Capacidade Instalada Acumulada (GW).	12
Figura 9. Radiação solar no plano horizontal, média anual e diária.....	13
Figura 10. Movimento da Terra em torno do Sol e as estações do ano no Hemisfério Sul.	20
Figura 11. Ângulos representando a posição do Sol em relação ao plano horizontal e ilustração da orientação de uma superfície inclinada em relação ao mesmo plano.	21
Figura 12. Efeito Fotovoltaico.....	22
Figura 13. Radiação solar e suas componentes.	23
Figura 14. Irradiância diária efetiva.	26
Figura 15. Irradiância anual efetiva.....	26
Figura 16. Total diário da irradiação no plano inclinado na latitude - médias mensais.	27
Figura 17. Sazonalidade da irradiação por estado.	28
Figura 18. Irradiação solar anual na região de Goiânia/GO.	28
Figura 19. Irradiação solar no plano horizontal para localidades próximas.....	28
Figura 20. Configuração básica de um Sistema Fotovoltaico Isolado – SFI.....	29
Figura 21. Sistema fotovoltaico conectado à rede.....	31
Figura 22. Exemplo de sistema híbrido.	32
Figura 23. Exemplo de um Sistema Fotovoltaico Integrado a Edificação (SFIE).	33
Figura 24. Sistemas de energia de grande porte.	34
Figura 25. O efeito fotovoltaico e a célula fotovoltaica.	37
Figura 26. Hierarquia fotovoltaica.	38
Figura 27. Componentes do módulo fotovoltaico.	39
Figura 28. Tipos mais comuns de Módulos Fotovoltaicos.....	40
Figura 29. Participação das tecnologias de módulos fotovoltaicos.	41
Figura 30. Representação do ponto de máxima potência.	42
Figura 31. Tipos de inversores classificados de acordo com o princípio de funcionamento. ..	44
Figura 32. Inversor solar central.....	47

Figura 33. Inversor multistring.	48
Figura 34. Micro inversor.	48
Figura 35. Otimizador de potência.	49
Figura 36. Estrutura de fixação em coberturas com telhas metálicas.	50
Figura 37. Estrutura de fixação em coberturas com telhas cerâmicas.	50
Figura 38. Estrutura de suporte do tipo Carport para utilização em estacionamentos.	50
Figura 39. Estrutura de fixação em lajes de concreto armado.	51
Figura 40. Estrutura de fixação no solo.	51
Figura 41. Estrutura de fixação no solo com a utilização da tecnologia de Trackers.	51
Figura 42. Padrão de cores para cabos.	53
Figura 43. Disjuntor Tripolar Schneider Eletric.	54
Figura 44. Fusível solar THS.	54
Figura 45. Chave seccionadora SIBRATEC.	55
Figura 46. Dispositivo de proteção contra surtos Clamper.	55
Figura 47. Interruptor diferencial residual tripolar Schneider Eletric.	56
Figura 48. Desenho de uma instalação típica de dispositivos de proteção para um SFCR,	57
Figura 49. Modelo de String Box.	58
Figura 50. Interface de monitoramento da Growatt.	59
Figura 51. Banco de baterias.	60
Figura 52. SFVI com a utilização de controlador de carga.	61
Figura 53. Irradiância e HSP.	63
Figura 54. Interface inicial do SOLergo.	65
Figura 55. Normas aplicáveis ao SFVCR.	67
Figura 56. Tela inicial do Software Solergo com os dados cadastrais do sistema - Etapa 1....	73
Figura 57. Tela do Software Solergo com a localização do sistema - Etapa 1.....	73
Figura 58. Tela do Software Solergo com dados do cliente - Etapa 1.	74
Figura 59. Tela do Software Solergo com informações de consumo - Etapa 1.	74
Figura 60. Tela inicial do Software Solergo com os dados cadastrais do sistema - Etapa 1....	75
Figura 61. Tela inicial do Software Solergo com os dados cadastrais do sistema - Etapa 1....	75
Figura 62. Tela do Software Solergo com os componentes do sistema - Etapa 1.....	76
Figura 63. Tela do Software Solergo com os dados cadastrais do sistema - Etapa 1.....	76
Figura 64. Tela do Software Solergo com o Layout - Etapa 1.	77
Figura 65. Tela do Software Solergo com a Gestão de Seções - Etapa 1.....	77
Figura 66. Tela do Software Solergo com o Diagrama Elétrico - Etapa 1.	78
Figura 67. Tela do Software Solergo com a Emissão de Poluentes - Etapa 1.....	78

Figura 68. Diagrama de radiação solar anual para as diversas formas de radiação.	81
Figura 69. Irradiação solar diária média mensal – CRESESB.	89
Figura 70. Autorização para execução do projeto.	92
Figura 71. Localização geográfica do projeto.	93
Figura 72. Informações da Carta de Orçamento.	93
Figura 73. Documento de Adesão ao sistema de compensação de energia.	94
Figura 74. Projeto de Subestação Aérea de 75kVA - Prancha 1.	95
Figura 75. Projeto de Subestação Aérea de 75kVA - Prancha 2.	96
Figura 76. Formulário de solicitação de acesso para a microgeração distribuída.	97
Figura 77. Projeto de aprovação da Usina Fotovoltaica - Prancha 1.	98
Figura 78. Projeto de aprovação da Usina Fotovoltaica - Prancha 2.	99
Figura 79. Projeto de aprovação da Usina Fotovoltaica – Prancha 3.	100
Figura 80. Materiais Elétricos Utilizados no Projeto.	102
Figura 81. Planilha orçamentária para a primeira etapa.	103
Figura 82. Planilha orçamentária da ampliação.	104
Figura 83. Projeto esquemático do aterramento.	105
Figura 84. Locação dos eletrodutos.	105
Figura 85. Locação da fundação.	106
Figura 86. Planta Baixa das instalações.	106
Figura 87. Planta Baixa do alambrado.	107
Figura 88. Quadro de Distribuição Geral.	107
Figura 89. Usina Fotovoltaica concluída – vista aérea 1.	108
Figura 90. Usina Fotovoltaica concluída – vista aérea 2.	108
Figura 91. Usina Fotovoltaica concluída – detalhe do alambrado.	108
Figura 92. Usina Fotovoltaica concluída – detalhe do sombreamento 1.	109
Figura 93. Usina Fotovoltaica concluída – detalhe do sombreamento 2.	109
Figura 94. Usina Fotovoltaica concluída – detalhe da subestação.	109
Figura 95. Usina Fotovoltaica concluída – abrigo do Inversor e do Quadro de Distribuição.	110
Figura 96. Usina Fotovoltaica concluída – Quadro de Distribuição.	110
Figura 97. Proposta de Orçamento para a instalação da Subestação de 75kVA.	111
Figura 98. Orçamento do Transformador de Potência de 75kVA.	111
Figura 99. Subestação de 75kVA – detalhe da alvenaria e alambrado.	113
Figura 100. Subestação de 75kVA – detalhe do Transformador.	113
Figura 101. Subestação de 75kVA – detalhe do Quadro de Distribuição.	114
Figura 102. Responsabilidade da Concessionária para a extensão da rede.	114

Figura 103. Extensão da rede realizada pela concessionária ENEL.....	114
Figura 104. Geração mensal da usina fotovoltaica em 2023.....	116
Figura 105. Geração mensal da usina fotovoltaica em 2024.....	116
Figura 106. Geração mensal da usina fotovoltaica em 2025.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Percentual de Oferta Interna de Energia.....	15
Tabela 2. Albedo em diversas superfícies.	23
Tabela 3: Unidades área radiação solar (irradiância e irradiação) e fatores de conversão.	25
Tabela 4. Consumo mensal das unidades consumidoras.....	69
Tabela 5. Dados Inseridos no Software Solergo - Etapa 1.	72
Tabela 6. Características do Projeto – Etapa 1.	79
Tabela 7. Radiação Solar na Horizontal.	80
Tabela 8. Produção de Energia Fotovoltaica.	80
Tabela 9. Exposições.	80
Tabela 10. Radiação Solar Anual com as Diversas Formas de Radiação.	81
Tabela 11. Dados do Gerador Fotovoltaico.....	82
Tabela 12. Dados Técnicos do Inversor.	83
Tabela 13. Distribuição dos Módulos nos Rastreadores (strings).	83
Tabela 14. Produção Efetiva de Energia som Perdas por Sombreamento.....	84
Tabela 15. Tabela de dados inseridos no Solergo - Etapa 2.....	85
Tabela 16. Características do Projeto – Etapa 2.	86
Tabela 17. Radiação Solar na Horizontal.	86
Tabela 18. Produção de Energia.	87
Tabela 19. Dados do Gerador Fotovoltaico – apenas da ampliação.....	87
Tabela 20. Dados Técnicos do Inversor – dados referentes à ampliação.	88
Tabela 21. Distribuição dos Módulos nos Rastreadores (strings).	88
Tabela 22. Produção Efetiva de Energia som Perdas por Sombreamento.....	89
Tabela 23. Propostas Orçamentárias para Instalação da Subestação de 75kVA.	112
Tabela 24. Proposta Orçamentária para o Transformador de 75kVA.	112
Tabela 25. Produção de energia da usina fotovoltaica (2023 a 2025).....	115
Tabela 26. Valor Economizado – 2023 a 2025.	117

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AM	Massa de Ar
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
a-Si	Módulo de silício amorfo
AVT	Avaliação de Viabilidade Técnica
CdTe	Módulo de Telureto de Cádmio
CIS ou CIGS	Módulo de disseleneto de cobre, índio e gálio
CRESESB	Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GD	Geração Distribuída
LT	Linha de Transmissão
MMGD	Microgeração e Minigeração Distribuída
m-Si	Módulo de silício monocristalino
OCDE	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OIE	Oferta Interna de Energia
OPV	Módulo de células orgânicas
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
p-Si	Módulo de silício policristalino
REN	Resolução Normativa
SCEE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SEN	Sistema Elétrico Nacional
SFIE	Sistemas Fotovoltaicos Integrados a Edificações
SFV	Sistema Fotovoltaico
SFVI ou SFI	Sistema Fotovoltaico Isolado
SFVCR ou SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
TFPV	Células fotovoltaicas de película fina
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
UFV	Usina Fotovoltaica

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{CT}	Área total da célula
A_{MT}	Área total do módulo
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
FF	Fator de Forma
G	Irradiância solar
G_{ALB}	Albedo
G_{DIF}	Irradiância difusa
G_{DIR}	Irradiância direta
G_{HOR}	Irradiância global
G_{TOT}	Irradiância total
GW	Gigawatt
H ou I	Irradiação solar
H_{DIF} ou I_{DIF}	Irradiação difusa
H_{DIR} ou I_{DIR}	Irradiação direta
H_{HOR} ou I_{HOR}	Irradiação global
H_{TOT} ou I_{TOT}	Irradiação total
I	Corrente Elétrica
I_{MP}	Corrente no ponto de Máxima Potência
I_{SC}	Corrente de Curto-Circuito
J/m ²	Joule por metro quadrado
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt hora
MW	Megawatt
MWh	Megawatt hora
m ²	Metros Quadrados
NOCT	Temperatura Nominal de Operação
P_i	Potência da radiação solar incidente sobre a área do conversor
P_{MP}	Potência no ponto de Máxima Potência
P_{NOM}	Potência Nominal
P_o	Potência obtida na saída do conversor
TWh	Terawatt hora
V	Diferença de potencial elétrico
V_{MP}	Tensão no ponto de Máxima Potência
V_{OC}	Tensão de Circuito Aberto
W/m ²	Watt por metro quadrado
Wh/m ²	Watt hora por metro quadrado
Wp	Watt-pico
α	Altura ou Elevação Solar
β	Inclinação da superfície de captação

γ	Ângulo Azimutal da Superfície
γ_s	Ângulo Azimutal do Sol
η	Eficiência
θ	Ângulo de incidência
θ_z	Ângulo Zenital
δ	Declinação Solar

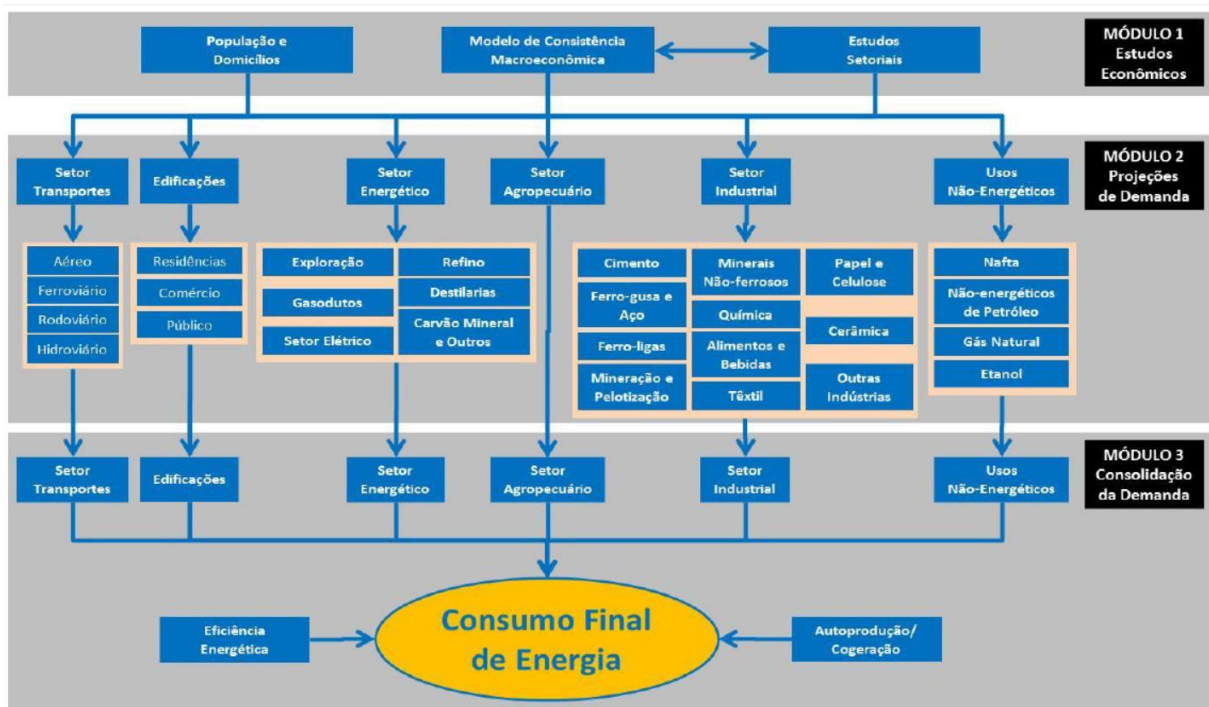
1 INTRODUÇÃO

A matriz energética mundial possui variadas fontes de geração de energia, que são responsáveis pelo abastecimento energético demandado pela sociedade, em todas as regiões do globo conforme as disponibilidades de recursos.

Essas fontes de energia podem ser classificadas como renováveis e não renováveis, sendo a primeira um tipo de fonte que se regenera naturalmente em um determinado período de tempo curto, podendo ser entendidas como inesgotáveis na escala de tempo de vida do ser humano; enquanto a segunda provém de recursos finitos que demoram um período de tempo bastante elevado em relação ao tempo de vida do ser humano para se regenerar e que geralmente resulta em danos significativos para o planeta quando consumida.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024) [1] há uma estrutura de consolidação do consumo final de energia que sumariza as demandas energéticas de acordo com os setores da sociedade e a fonte desta energia, compondo assim o consumo final de energia. Na Figura 1 está descrito na forma de fluxograma esta estrutura.

Figura 1. Estrutura de consolidação da projeção do consumo final de energia.



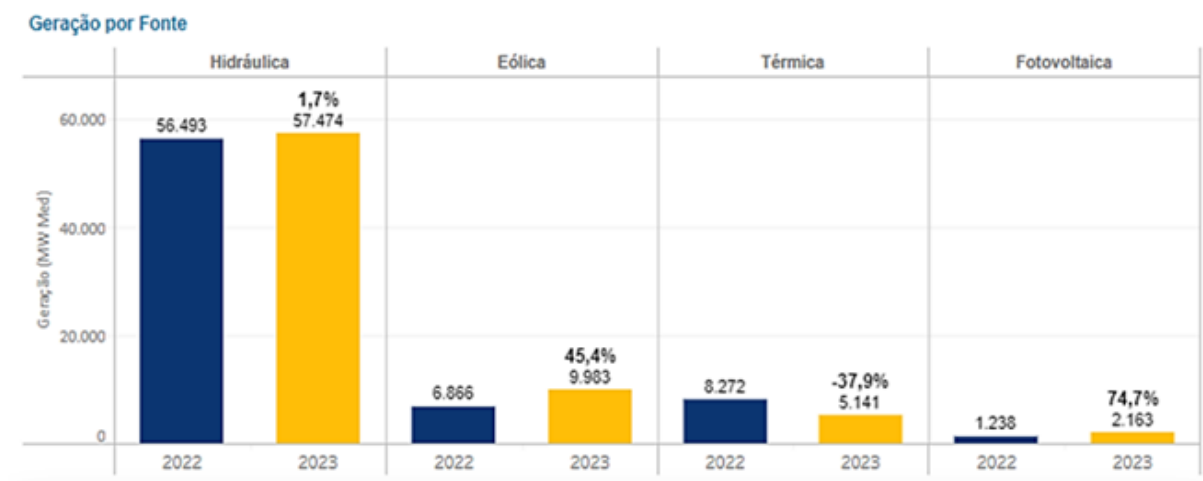
Fonte: EPE (2024) [1].

Em decorrência das revoluções industriais e tecnológicas, o mundo vem dependendo predominantemente de fontes de energia baseadas em fontes não renováveis, como combustíveis fósseis, carvão, petróleo e gás natural.

Entretanto, os impactos ambientais negativos causados por essas fontes, como o aumento das emissões de gases poluentes, têm gerado uma conscientização sobre a urgência na busca de uma transição para fontes mais sustentáveis. Além disso, este processo é impulsionado por fatores que tomaram palco nas discussões mais recentes sobre o assunto, como o esgotamento das reservas fósseis e não renováveis de geração, a crescente demanda energética pela sociedade e as preocupações ambientais.

A Figura 2 ilustra a produção de energias renováveis no Brasil em 2022 e 2023, com destaque para a geração hidráulica, eólica, térmica e fotovoltaica. Observa-se que no ano de 2023, em relação ao ano anterior, houve um aumento de 74,7% na geração de energia fotovoltaica.

Figura 2. Produção de energias renováveis no Brasil em 2022 e 2023.



Fonte: EPE (2024) [1].

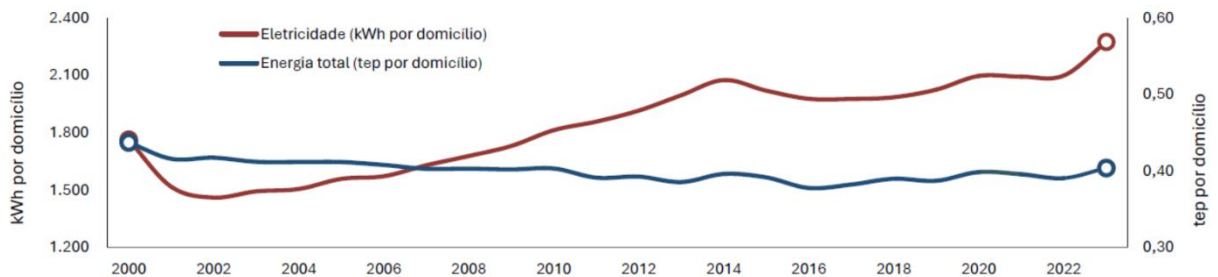
De acordo com EPE (2024) [1], historicamente, o Brasil vem se destacando por ser um país com um alto percentual de fontes renováveis de energia em sua oferta interna quando comparado ao resto do mundo, sendo que, nos últimos 20 anos, a participação das renováveis na matriz energética brasileira, manteve-se estável com valores superiores a 40%. Além disso, a matriz brasileira é uma das mais renováveis do mundo, possuindo uma característica de integração espacial, através do sistema de transmissão, muito importante para o aproveitamento do potencial das abundantes fontes renováveis disponíveis para a exploração em território nacional.

Destaca-se a importância das usinas hidrelétricas, que desde o princípio da eletrificação do país é a principal fonte de energia do nosso sistema e possui características renováveis fundamentais para que possamos passar com maior segurança por essa transição energética (EPE, 2023) [2].

Inserida no contexto da matriz energética, existe uma crescente demanda por energia elétrica, tendo em vista a constante evolução da tecnologia de sistemas digitais e a dependência de energia elétrica para alimentar indústrias cada vez mais digitais e uma sociedade cada vez mais integrada com os meios digitais de convivência e produção. pode-se observar.

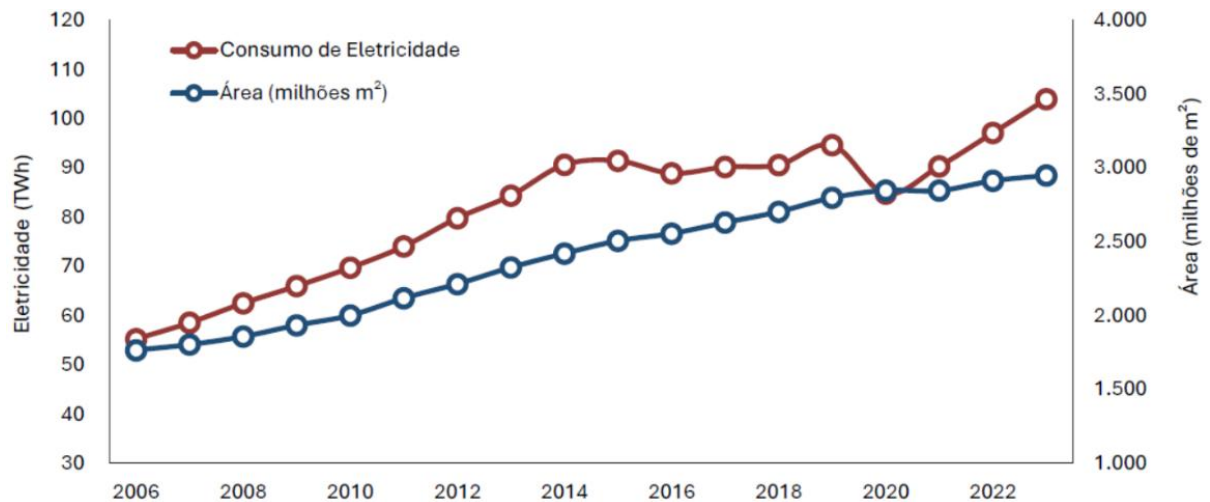
A crescente demanda energética no Brasil de acordo com os indicadores anuais segundo o Atlas da Eficiência Energética (EPE, 2024) [1], está apresentada nas figuras 3-5.

Figura 3. Evolução da demanda residencial elétrica e energética.



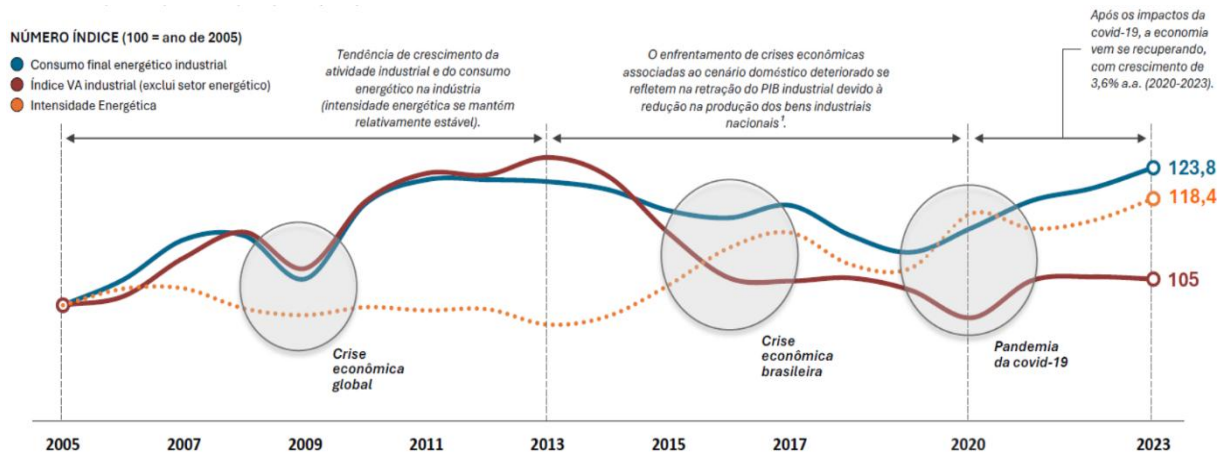
Fonte: EPE (2024) [1].

Figura 4. Evolução do consumo de eletricidade e área do setor comercial.



Fonte: EPE (2024) [1].

Figura 5. Consumo energético e valor adicionado das indústrias no Brasil.

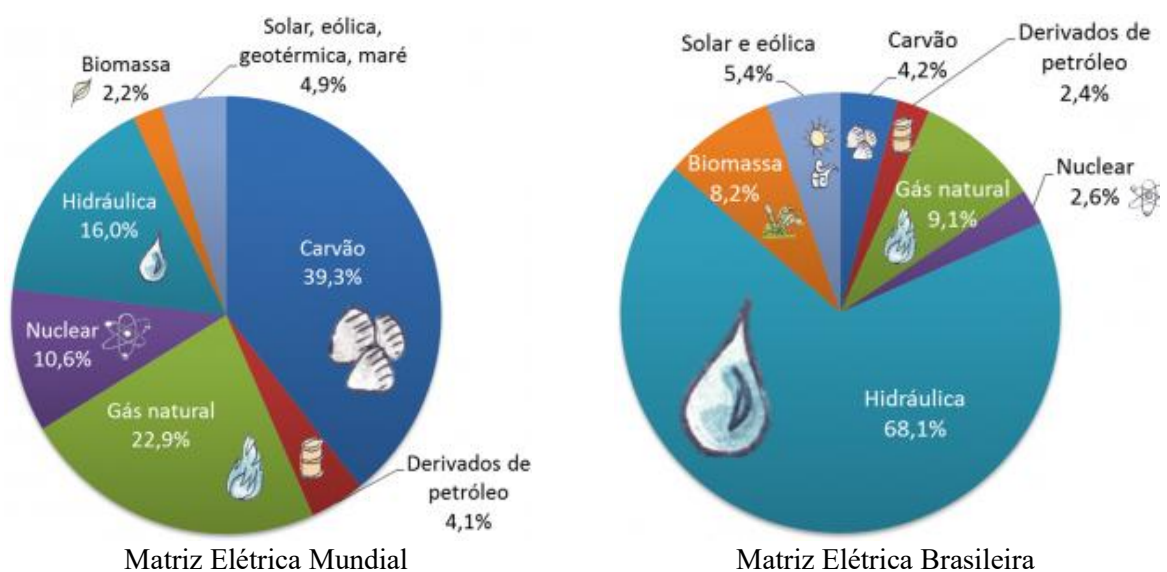


Fonte: EPE (2024) [1].

As figuras 3-5, referentes aos setores residencial, comercial e industrial, indicam um crescimento anual da necessidade de energia elétrica, sendo a Figura 3 Essa crescente está sendo causada por diversos motivos oriundos da evolução da sociedade humana, sendo, portanto, necessário buscar a ampliação da produção dessa energia, porém atrelada com as limitações e objetivos do cenário atual do planeta.

A matriz elétrica mundial ainda é predominantemente baseada na utilização de combustíveis fósseis, em especial o carvão. Por outro lado, o Brasil possui uma das matrizes elétricas mais limpas do mundo, ficando em 3º lugar no ranking de países com maior capacidade instalada de fontes renováveis, atrás apenas de China e EUA. A Figura 6 ilustra as matrizes elétricas mundial e nacional.

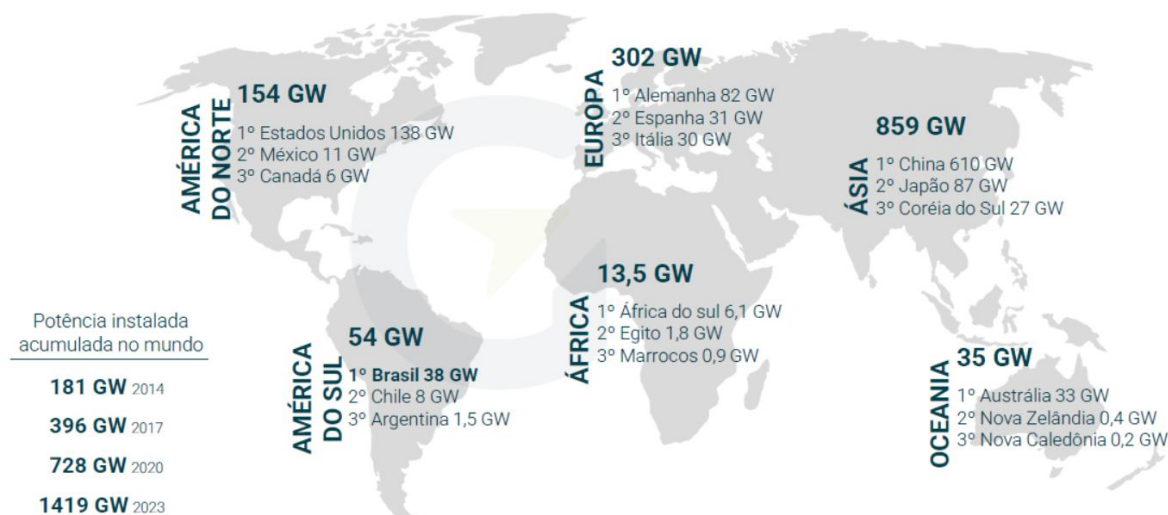
Figura 6. Matriz elétrica mundial e nacional.



Fonte: EPE (2024) [1].

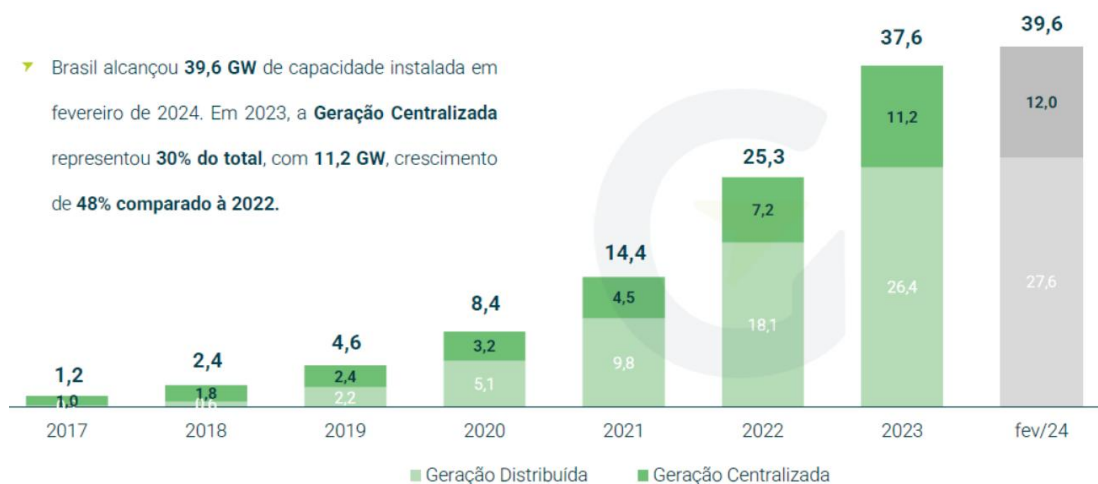
Nesse contexto, juntamente com a necessidade de descentralização da produção elétrica, a energia solar fotovoltaica se apresenta como uma alternativa importante para diversificar a matriz, com destaque para países com alto índice de radiação solar, como o Brasil (EPE, 2023) [2]. Greener (2025) [3] destaca o crescimento histórico da energia solar no mundo e no Brasil, conforme ilustrado nas figuras 7-8.

Figura 7. Energia Solar no Mundo – Potência Instalada Acumulada (GW) até 2023.



Fonte: Greener (2025) [3].

Figura 8. Energia Solar no Brasil - Capacidade Instalada Acumulada (GW).



Fonte: Greener (2025) [3].

Foi observado um aumento de potência instalada de energia solar nos últimos seis anos, tanto no Brasil como no mundo. Isto se deve principalmente à redução dos custos de produção e instalação dos componentes do sistema de produção de energia solar, ocasionados principalmente pela atuação da China no setor, atrelado à demanda por fontes de energia renováveis e descentralizadas.

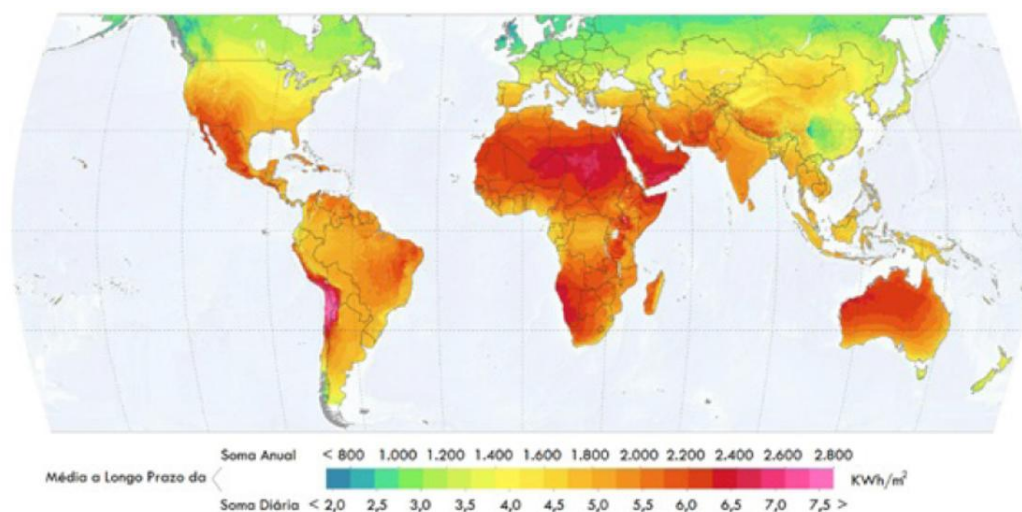
De acordo com SEBRAE (2018, apud IEA, 2011, p. 43) [4], “[...] a energia solar fotovoltaica poderá representar um terço da produção global de energia elétrica do mundo até 2060”, representando mais de 25% da matriz elétrica global já em 2040 (SEBRAE, 2018 apud BNEF, 2016).

Com isso, SEBRAE (2018, p. 43) [4] afirma que, “[...] a energia fotovoltaica tem o potencial para ser a maior fonte de eletricidade no mundo em longo prazo, devido à abundância e à distribuição do recurso solar no planeta, à constante redução dos custos da tecnologia (histórico e projeção) e às melhorias em eficiência de materiais e conversão. Isso sem mencionar a tendência global em direção às fontes de energia limpas e sustentáveis e as mudanças climáticas”.

Ademais, de acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia (EPE, 2024) [1], a geração distribuída deve atingir 58,8 GW de potência instalada no Brasil até 2034, representando cerca de 16% da matriz elétrica brasileira.

A Figura 9 ilustra a disponibilidade e distribuição da radiação solar no mundo, mostrando as regiões com maior potencial (SEBRAE, 2018) [4].

Figura 9. Radiação solar no plano horizontal, média anual e diária.



Fonte: SEBRAE (2018 apud SOLARGIS, 2016) [4].

A partir da análise da imagem e da visão de futuro no campo da energia, pode-se inferir que o Brasil apresenta um ótimo recurso solar e é um grande candidato à ampliação da sua capacidade de geração de energia solar fotovoltaica, chegando a ter como principal fonte de geração da sua matriz energética.

A energia solar no Brasil passou por diversas fases. Inicialmente, ela era empregada em aplicações isoladas e em projetos para alimentação de unidades rurais, entretanto esta

tecnologia foi sendo incorporada aos poucos no setor elétrico, principalmente devido à expansão da geração distribuída.

O primeiro marco regulatório veio em 2012, com a publicação da Resolução Normativa nº 482 da ANEEL, que criou o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE), permitindo que os consumidores pudessem gerar sua própria energia por meio de sistemas conectados à rede, utilizando fontes renováveis, especialmente a solar. Essa resolução viabilizou a conexão da geração distribuída ao Sistema Elétrico Nacional (SEN), incorporando o uso da energia excedente como créditos a serem compensados em ciclos seguintes (ANEEL, 2012) [5].

Posteriormente, veio a evolução da regulação com a publicação da Resolução Normativa nº 687 em 2015, que atualizou a REN 482 e ampliou as possibilidades de adesão ao SCEE. Foram introduzidas novas modalidades, como a geração compartilhada, os empreendimentos com múltiplas unidades consumidoras e o autoconsumo remoto. Esta alteração da regulamentação foi fundamental para o avanço na construção de grandes usinas fora dos centros urbanos, inclusive com a implementação de incentivos locais de governos estaduais e cooperativas (SEBRAE, 2018) [4].

No ano de 2019, foi publicada oficialmente a Norma ABNT NBR 16690, após um processo de elaboração e consulta pública iniciado em 2016 (CANAL SOLAR, 2019) [6]. Ela normatiza as instalações fotovoltaicas, estabelecendo requisitos de projeto, desempenho, segurança e conectividade. Esta norma tem como objetivo garantir a padronização e a confiabilidade técnica das instalações, de acordo com normas internacionais (ABNT, 2019) [7].

Com o rápido crescimento da micro e minigeração distribuída, tornou-se necessário a implementação de um marco legal mais sólido. Com isso, em 2022 foi sancionada a Lei nº 14.300, instituindo o Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída (MMGD), consolidando os direitos adquiridos por consumidores que já haviam aderido ao sistema, criando regras de transição até 2045 das alterações tarifárias, e estabeleceu regras mais claras para os projetos futuros, promovendo segurança jurídica e previsibilidade para investidores (BRASIL, 2022) [8]. Em um dos seus itens mais importantes, a lei classificou a microgeração como sistemas com potência de até 75 kW e a minigeração como aqueles entre 75 kW e 5 MW, além de estabelecer um plano de escalonamento na cobrança do Fio B da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) para novos projetos conectados a partir de janeiro de 2023.

No ano de 2023, a Resolução Normativa nº 1.059/2023 da ANEEL regulamentou os aspectos operacionais da Lei 14.300/2022, definindo os procedimentos de acesso, faturamento, compensação, limites de potência e exclusões, como a fragmentação de unidades geradoras (BRASIL, 2023) [9].

A Tabela 1 apresenta a evolução anual em porcentagem da oferta interna de energia para as diferentes fontes energéticas.

Tabela 1. Percentual de Oferta Interna de Energia.

FONTES	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	SOURCES
ENERGIA NÃO RENOVÁVEL	60,3	58,5	56,3	56,6	54,2	53,6	51,3	54,8	52,6	50,9	NON-RENEWABLE ENERGY
PETRÓLEO E DERIVADOS	39,2	37,2	36,4	36,0	34,1	34,1	32,9	34,1	35,6	35,1	PETROLEUM AND OIL PRODUCTS
GÁS NATURAL	13,5	13,6	12,3	12,9	12,3	12,2	11,7	13,2	10,5	9,6	NATURAL GAS
CARVÃO MINERAL E COQUE	5,7	5,9	5,5	5,7	5,6	5,2	4,8	5,6	4,6	4,4	COAL AND COKE
URÂNIO (U ₃ O ₈)	1,3	1,3	1,5	1,4	1,4	1,5	1,3	1,3	1,3	1,2	URANIUM - U ₃ O ₈
OUTRAS NÃO RENOVÁVEIS	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	OTHER NON-RENEWABLES
ENERGIA RENOVÁVEL	39,7	41,5	43,7	43,4	45,8	46,4	48,7	45,2	47,4	49,1	RENEWABLE ENERGY
HIDRÁULICA ¹	11,4	11,3	12,5	11,9	12,5	12,3	12,5	10,9	12,5	12,1	HYDRAULIC ¹
LENHA E CARVÃO VEGETAL	8,2	8,3	8,1	8,4	9,0	8,9	9,1	9,0	9,0	8,6	FIREWOOD AND CHARCOAL
DERIVADOS DA CANA	15,7	16,9	17,4	16,9	17,2	17,9	19,0	16,5	15,4	16,8	SUGAR CANE PRODUCTS
EÓLICA	0,3	0,6	1,0	1,2	1,4	1,6	1,7	2,0	2,3	2,6	WIND
SOLAR	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,2	1,7	SOLAR
OUTRAS RENOVÁVEIS	3,7	4,1	4,4	4,7	5,3	5,2	5,7	5,9	7,0	7,2	OTHER RENEWABLES
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	TOTAL

1. Inclui importação de eletricidade oriunda de fonte hidráulica. 1 kWh = 860 kcal (equivalente térmico teórico - primeiro princípio da termodinâmica). Ver Anexo VI.6 - Tratamento das informações. / Includes electricity imports originated from hydraulic sources. 1 kWh = 860 kcal (physical equivalent - First Principle of Thermodynamics). Look Appendix VI.6.

Fonte: EPE (2024) [1].

Conforme dados da Tabela 1, apesar da capacidade instalada de energia solar ter aumentado de 1,2 GW para 39,6 GW entre os anos de 2017 e 2024 (GREENER, 2025) [3], tratando-se de um aumento de aproximadamente 3.200,00%, a representação da energia gerada por essa fonte na oferta interna de energia passou de 0,3% para 1,7%, um aumento de 466,67%.

Observe que, nesta última década, apesar do aumento exponencial na demanda por energia, houve um aumento significativo da oferta de energia proveniente de fontes renováveis. Todavia, o país oferece uma enorme capacidade para a expansão da produção de energia solar, que deverá ser explorada nos próximos anos, permitindo um vasto campo para o desenvolvimento e execução de projetos na área de engenharia elétrica.

O objeto de estudo deste trabalho está inserido no cenário de geração de energia na modalidade de autoconsumo remoto. Esta modalidade se mostrou particularmente atrativa para o setor rural, permitindo que propriedades com grandes áreas, com grande capacidade de geração, compartilhassem os créditos de energia com outras unidades (SEBRAE, 2018) [4].

O autoconsumo remoto abre a possibilidade para que o consumidor, na condição de que os dois locais estejam dentro da área de concessão da mesma distribuidora e estejam na sua titularidade, consiga instalar o seu sistema de geração em local distinto ao de consumo. (Portal Solar, 2021) [10].

Isto proporcionou a exploração da geração própria, abrindo novos horizontes para indivíduos que possuem um elevado custo mensal com energia elétrica, geralmente proveniente de diversas unidades consumidoras.

1.1 Justificativa

Este trabalho se limita às informações e dados específicos obtidos por levantamentos realizados em campo, por documentações enviadas pelo cliente e através dos documentos arquivados de todo o processo legal para possibilitar o funcionamento da usina. Sendo assim, as análises serão realizadas a partir do que está disponível para estudo, podendo ter suas conclusões extrapoladas para um bom entendimento do cenário em geral.

Portanto, não será abordado neste trabalho as definições técnicas de dimensionamento e orçamento de execução de Linhas de Transmissão (LT). A modalidade escolhida para a execução da LT nesse caso foi de construção pela própria concessionária, não sendo gerados dados para análise da execução dessa linha. O que está disponível e o que será abordado neste trabalho é o descrito na Avaliação de Viabilidade Técnica (AVT).

O aumento na oferta de energia fotovoltaica, conforme ilustrado nas figuras 2-6, resulta da preferência de novos clientes pela implantação de usinas fotovoltaicas como uma solução limpa e eficaz de energia. Este projeto se baseia na construção de uma subestação de energia fotovoltaica, atendendo aos requisitos da ABNT, e sendo classificado como GD (Geração e Distribuição) de energia.

1.2 Objetivos Gerais

Realizar um estudo de caso da execução de uma usina fotovoltaica em zona rural da cidade de Niquelândia - Goiás, analisando desde a etapa comercial, o desenvolvimento do projeto, o dimensionamento dos equipamentos e orçamento de instalação. Também serão incluídos os detalhes de enquadramento normativo e tarifário, até a fase final de entrega da usina em funcionamento.

Durante o processo, serão abordados todos os trâmites com a concessionária de energia da época da instalação, analisando o estudo de viabilidade técnica, o orçamento de conexão, o projeto executivo da subestação e da usina, a solicitação de acesso e as vistorias.

Por fim, este trabalho trará uma análise de retorno financeiro, apresentando o histórico de geração da usina e o abatimento nas contas de energia do investidor para um projeto de Geração e Distribuição (GD), onde se demonstra o retorno financeiro em poucos meses após a implantação da usina.

1.3 Objetivos Específicos

Para o alcance do objetivo geral proposto, alguns objetivos específicos são desenvolvidos no decorrer do trabalho, tais como:

- Analisar as contas de energia na época em que foi solicitado o orçamento;
- Avaliar o pré-projeto e o orçamento de instalação;
- Levantar as etapas para a solicitação de liberação da usina junto à concessionária;
- Analisar a viabilidade técnica da instalação;
- Conferir o dimensionamento e projeto do sistema de geração de acordo com as normas específicas;
- Avaliar os contratos acordados entre o investidor e a concessionária a respeito do uso e operação da usina e da subestação;
- Analisar a geração de energia após o início do funcionamento da usina
- Analisar o abatimento dos créditos de geração nas contas do investidor;
- Analisar o estudo de retorno financeiro;
- Estimular acadêmicos de engenharia a trabalharem e se interessarem em áreas assim, de produção de energia sustentável, onde há uma demanda grande, competitiva e com grande retorno financeiro.

1.4 Metodologia

A estrutura deste trabalho é dividida nas seguintes etapas:

- Pesquisa bibliográfica centrada em trabalhos cujo tema inclua o projeto, a execução e a ligação de usinas fotovoltaicas (UFV) ao sistema elétrico em zonas rurais;
- Pesquisa de campo, fazendo o levantamento da necessidade prévia de geração e a estrutura elétrica da região antes da instalação da usina;
- Estudos de caso verificando o dimensionamento e orçamento do sistema de geração;
- Estudos de caso verificando o projeto do sistema de geração, da subestação e das proteções dos sistemas;
- Análise crítica dos dados obtidos em pesquisas já realizadas;
- Estudos de caso verificando os procedimentos de liberação, junto à concessionária de energia, para a execução da usina;
- Análise crítica dos prazos e etapas de documentação da concessionária de energia;
- Levantamento dos dados de geração da usina;
- Levantamento dos abatimentos dos créditos de energia nas contas do investidor;
- Construção de gráficos e tabelas, mostrando o estudo de retorno financeiro do investimento;
- Discussão sobre os dados obtidos, verificando a possibilidade de apresentação do empreendimento como um modelo de negócio;

1.5 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho foi estruturado em sete capítulos.

No Capítulo 1, Introdução, é abordada a contextualização da proposta do trabalho, a justificativa e os objetivos gerais e específicos.

No Capítulo 2, Revisão da Literatura, são apresentados os conceitos fundamentais relacionados à energia solar fotovoltaica, à geração distribuída e às normativas brasileiras que regulamentam o tema.

No Capítulo 3, são abordadas as definições de equipamentos, dimensionamento de sistemas, conceitos de eficiência de geração e histórico regulatório.

No Capítulo 4, são apresentados os detalhes sobre o dimensionamento e projeto de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFVCR), ou *on-grid*.

No Capítulo 5 é realizado o dimensionamento do projeto de uma usina fotovoltaica na zona rural da cidade de Niquelândia – Goiás.

No Capítulo 6 são apresentadas as solicitações técnicas enviadas à concessionária de energia da época, a Enel Distribuição.

No Capítulo 7 são apresentados os procedimentos de execução da usina fotovoltaica e da subestação, os resultados obtidos, as conclusões sobre o projeto, as considerações finais do trabalho bem como proposições para estudos futuros sobre o tema em estudo.

2 SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

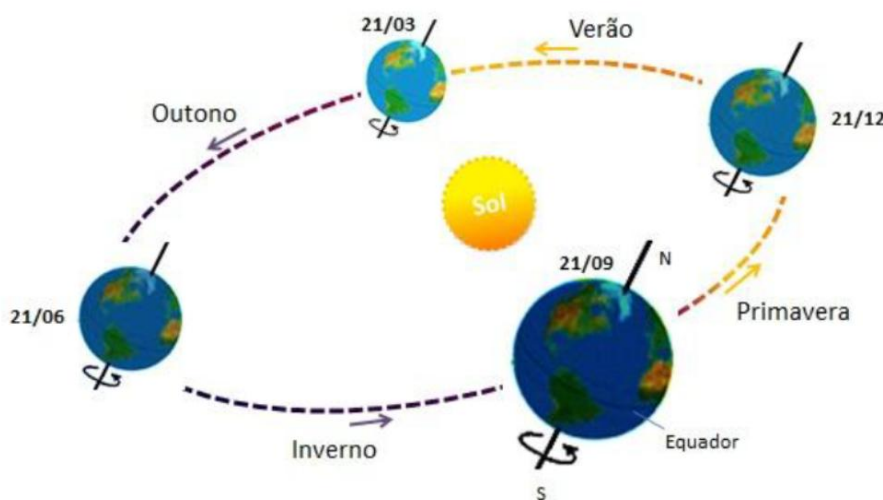
2.1 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica vem se destacando no cenário atual como uma das principais fontes de energia renovável do mundo. Isto se deve a sua abundância, sustentabilidade e capacidade para se integrar com outros tipos de sistemas elétricos. No Brasil, o aproveitamento desta fonte de geração é peculiarmente vantajoso devido aos elevados índices de incidência solar em território nacional.

A existência deste processo que consegue transformar um tipo de energia em outro depende de fatores físicos do universo. O primeiro deles se refere à fonte da energia primária, que é o Sol. De acordo com Pinho e Galdino (2014) [11], o sol, que é a fonte de energia mais abundante e inesgotável na escala terrestre de tempo, é basicamente uma esfera de gás incandescente, em cujo núcleo acontece a geração de energia através de reações termonucleares. Essa energia viaja pelo sistema através dos raios solares até atingirem a Terra.

A chegada desses raios se dá de acordo com o segundo fator físico, a posição da Terra. Em seu movimento anual ao redor do sol, a Terra descreve uma trajetória elíptica com uma pequena excentricidade e possui uma inclinação, também chamada de Declinação Solar (δ), em relação ao plano normal à elipse, de aproximadamente $23,45^\circ$ (PINHO; GALDINO, 2014) [11]. A Figura 10 ilustra a trajetória elíptica com a inclinação da terra e o efeito do surgimento de estações do ano.

Figura 10. Movimento da Terra em torno do Sol e as estações do ano no Hemisfério Sul.



Fonte: Pinho e Galdino (2014) [11].

A declinação solar pode ser calculada utilizando a seguinte equação [11]:

$$\text{sen } \delta = -23,45^0 \left[\left(\frac{360}{360,25} \right) (n + 10) \right] \quad \text{Eq. 1}$$

Sendo n a representação do dia juliano, contado de 1 a 365 a partir de 1 de janeiro.

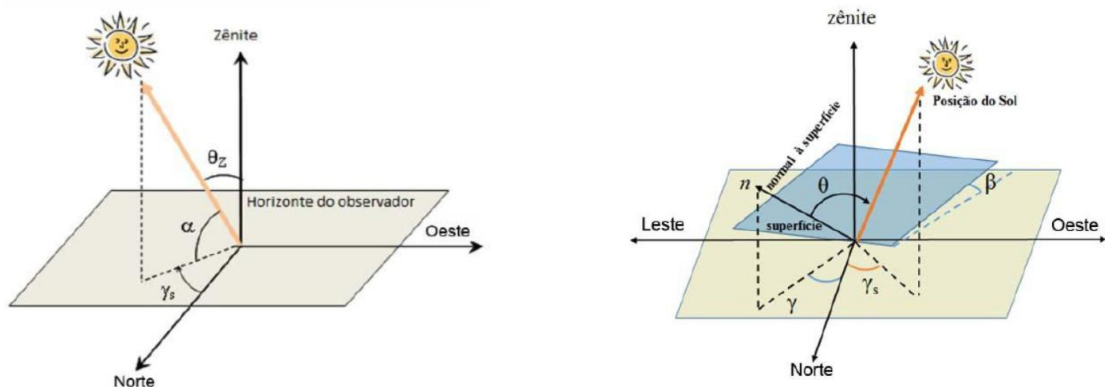
Outro fator físico são os ângulos da geometria solar, sendo eles (PINHO; GALDINO, 2014) [11]:

- Ângulo Zenital (θ_z):** o ângulo formado entre os raios do Sol e a vertical local, ou zênite;
- Altura ou Elevação Solar (α):** o ângulo compreendido entre os raios de Sol e a projeção deles sobre o plano horizontal;
- Ângulo Azimutal do Sol (γ_s):** ou azimuth solar, que é o ângulo entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção Norte-Sul;
- Ângulo Azimutal da Superfície (γ):** o ângulo entre a projeção normal à superfície no plano horizontal e a direção Norte-Sul;
- Inclinação da superfície de captação (β):** o ângulo entre o plano da superfície em questão e o plano horizontal;
- Ângulo de incidência (θ):** o ângulo formado entre os raios do Sol e a normal à superfície de captação.

A respeito desses ângulos, algumas relações devem ser estabelecidas, como:

$\theta_z + \alpha = 90^\circ$, e $-180^\circ(\text{Oeste}) \leq \gamma_s \leq 180^\circ(\text{Leste})$, sendo tomado a partir do Norte Geográfico (0°). A disposição geométrica desses ângulos está ilustrada na Figura 11.

Figura 11. Ângulos representando a posição do Sol em relação ao plano horizontal e ilustração da orientação de uma superfície inclinada em relação ao mesmo plano.



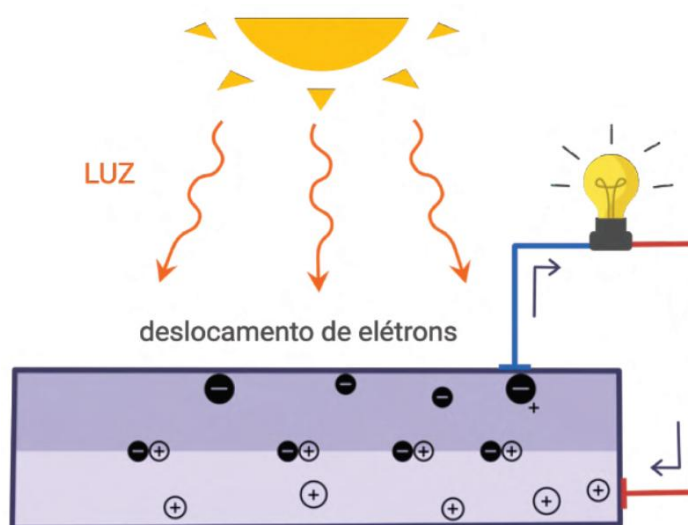
Fonte: Pinho e Galdino (2014) [11].

2.2 Efeito Fotovoltaico

Segundo EPE (2023) [2], o princípio de funcionamento da energia Solar Fotovoltaica se baseia no efeito fotovoltaico, quando uma célula fotovoltaica, composta por materiais semicondutores, recebe a luz ou radiação eletromagnética do Sol incidindo sobre ela, ocorrendo assim a transformação da radiação em energia elétrica.

O fenômeno do efeito fotovoltaico está ilustrado na Figura 12.

Figura 12. Efeito Fotovoltaico.



Fonte: Mariano e Junior (2022) [12].

Segundo Mariano e Junior (2022) [12], esses materiais semicondutores são capazes de absorver a energia transformando-as em eletricidade, isto ocorre através da quebra das ligações químicas entre as moléculas presentes em suas estruturas, as quais liberam cargas elétricas que podem ser utilizadas para a realização de trabalho.

2.3 Radiação Solar no Brasil

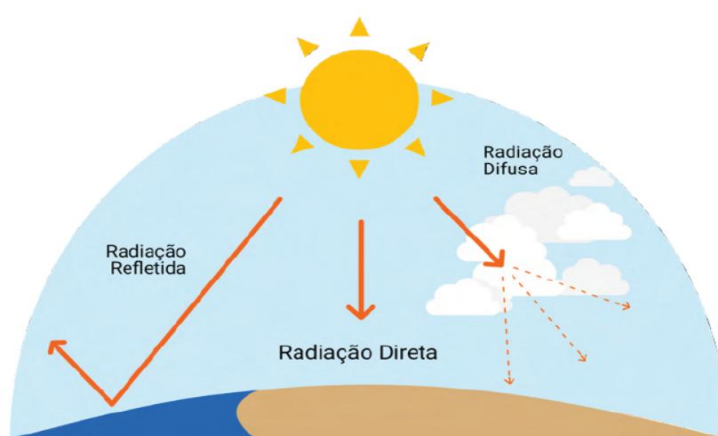
Segundo Mariano e Junior (2022) [12], a radiação é a forma de transferir a energia gerada no Sol através de propagação de ondas eletromagnéticas. Além disso, Pinho e Galdino (2014, p. 70) [11] diz que “o termo *radiação solar* é usado de forma genérica e pode ser referenciado em termos de fluxo de potência, quando é especificamente denominado de irradiância solar, ou em termos de energia por unidade de área, denominado, então, de irradiação solar.”

Em termos de radiação solar, existem três componentes estudadas, sendo elas [12]:

- i. **Radiação direta:** corresponde aos raios solares que chegam diretamente do sol em linha reta e incidem sobre a superfície da Terra;
- ii. **Radiação difusa:** corresponde aos raios solares que mudam a direção após atravessarem algum meio através da difração;
- iii. **Radiação devida ao albedo:** corresponde à fração da radiação que é refletida pela superfície.

Estas componentes estão ilustradas na Figura 13.

Figura 13. Radiação solar e suas componentes.



Fonte: Mariano e Junior (2022) [12].

No estudo da geração, as tecnologias modernas adicionaram ganhos de geração de energia através de módulos fotovoltaicos bi-faciais, que utilizam a radiação refletida pelo albedo. Os coeficientes utilizados para quantificar o valor do albedo de algumas superfícies em relação à radiação que incide nela estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Albedo em diversas superfícies.

Superfície	Albedo
Gramado	0,18 – 0,23
Gramma seca	0,28 – 0,32
Solo descampado	0,17
Asfalto	0,15
Concreto novo (sem ação de intempéries)	0,55
Concreto (em construção urbana)	0,2
Neve fresca	0,8 – 0,9
Água, para diferentes valores de altura solar:	
$\alpha > 45^\circ$	0,05
$\alpha = 30^\circ$	0,08
$\alpha = 20^\circ$	0,12
$\alpha = 10^\circ$	0,22

Fonte: Pinho e Galdino (2014) [11].

Em termos de irradiância solar, a NBR 10899:2006 Energia solar fotovoltaica – Terminologia apresenta as seguintes definições (MARIANO; JUNIOR, 2022, apud ABNT, 2006) [12]:

- a) **Irradiância solar (G):** a taxa na qual a radiação solar incide por unidade de área, medida em Watt por metro quadrado (W/m^2);
- b) **Irradiância direta (G_{DIR}):** a irradiância que incide diretamente sem ter sido atrapalhada;
- c) **Irradiância difusa (G_{DIF}):** toda a potência radiante do céu, excluída a irradiância direta;
- d) **Irradiância global (G_{HOR}):** a potência radiante solar que soma o G_{DIR} e o G_{DIF} ;
- e) **Albedo (G_{ALB}):** fração da radiação que é refletida pela superfície;
- f) **Irradiância total (G_{TOT}):** a potência radiante solar total, somando G_{DIR} , G_{DIF} e o G_{ALB} .

Em termos de irradiação solar, a mesma NBR 10899:2006 apresenta as seguintes definições (MARIANO; JUNIOR, 2022, apud ABNT 2006)) [12]:

- a) **Irradiação solar (“I” quando em uma hora ou “H” quando em um dia):** a Irradiância solar durante um intervalo de tempo especificado, medida em Watt hora por metro quadrado ou Joule por metro quadrado (Wh/m^2 ou J/m^2);
- b) **Irradiação difusa (I_{DIF} ou H_{DIF}):** a irradiância difusa durante um intervalo de tempo;
- c) **Irradiação direta (I_{DIR} ou H_{DIR}):** a irradiância direta durante um intervalo de tempo;
- d) **Irradiação global (I_{HOR} ou H_{HOR}):** a irradiância global durante um intervalo de tempo;
- e) **Irradiação total (I_{TOT} ou H_{TOT}):** a irradiância total durante um intervalo de tempo e a que será aplicada nos projetos fotovoltaicos.

Existem muitas unidades utilizadas para mensurar a radiação solar, e geralmente para a formulação e projeto de sistemas, é necessária a conversão para a unidade adequada. Para auxiliar este processo, as conversões entre as unidades estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Unidades área radiação solar (irradiância e irradiação) e fatores de conversão.

Para converter de:	Para:	Multiplique por:
cal/cm ² .min	W/m ²	697,8
W/m ²	cal/cm ² .min	0,0014331
W/m ²	mcal/cm ² .s	0,023885
MJ/m ² .dia	kWh/m ² .dia	0,27778
Langley/dia	kWh/m ² .dia	0,01163
cal/cm ²	J/cm ²	4,1868
cal/cm ²	kWh/m ²	0,01163
J/cm ²	cal/cm ²	0,23885
J/cm ²	kWh/m ²	0,0027778
kWh/m ²	cal/cm ²	85,985
kWh/m ²	J/cm ²	360
Langley	cal/cm ²	1

Fonte: Pinho e Galdino (2014) [11].

A intensidade média da irradiância solar, também conhecida como “constante solar” (G_{AMO}) possui o valor de 1.367 W/m² (MARIANO; JUNIOR, 2022) [12], De acordo com Pinho e Galdino (2014) [11], a excentricidade da trajetória da Terra resulta em uma variação no valor da irradiância ao longo do ano, o que pode ser calculado a partir da seguinte equação:

$$G_{AMO,ef} = G_{AMO} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360}{360,25} n \right) \right] \quad \text{Eq. 2}$$

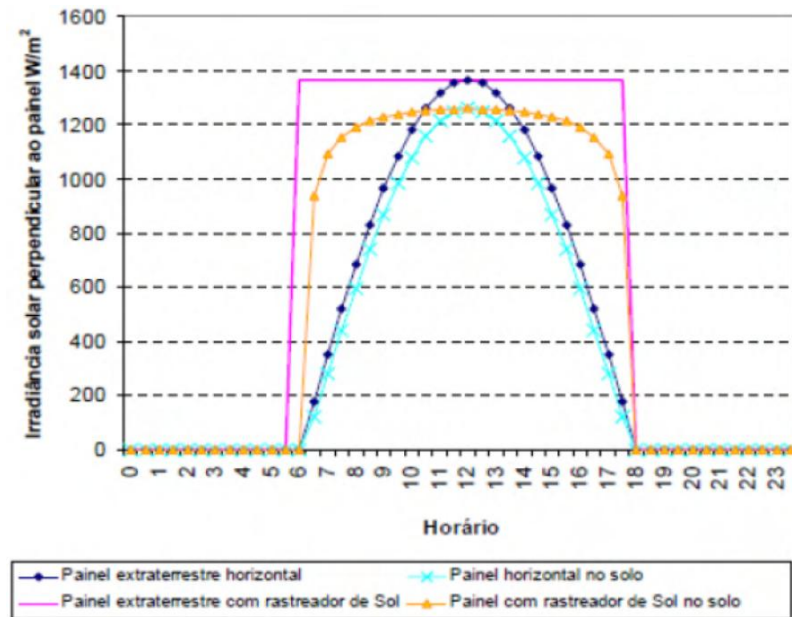
sendo n a representação do dia juliano, contado de 1 a 365 a partir de 1º de janeiro.

De acordo com Mariano e Junior (2022) [12], na superfície terrestre essa intensidade de radiação chega ao valor máximo de $G_{HOR} = 1.000$ W/m². Sendo assim, pode-se aplicar a mesma fórmula de irradiância ao longo do ano para a obtenção da irradiância efetiva na superfície terrestre.

Por meio da irradiância se obtém a energia fotovoltaica. O comportamento diário e anual da irradiância no Brasil está apresentado, respectivamente, nas figuras 14 e 15.

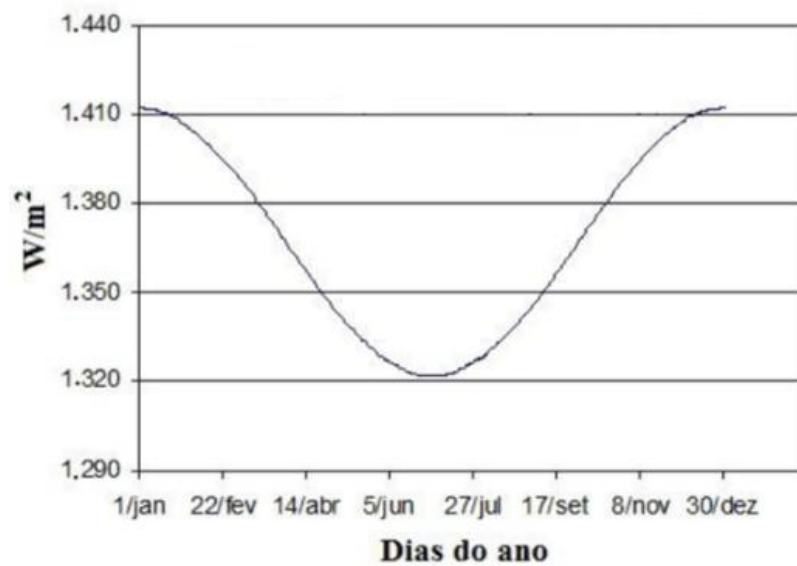
No Brasil, a máxima irradiância ocorre entre os meses de setembro a dezembro, conforme ilustrado na Figura 15. No primeiro semestre, a irradiação favorável decai de fevereiro a abril, justamente porque há duas estações bem definidas em grande parte do país, e nesta época, a inclinação terrestre não permite que se tenha boa captação dos raios solares, em comparação com o segundo semestre do ano.

Figura 14. Irradiância diária efetiva.



Fonte: Mariano e Junior (2022) [12].

Figura 15. Irradiância anual efetiva.

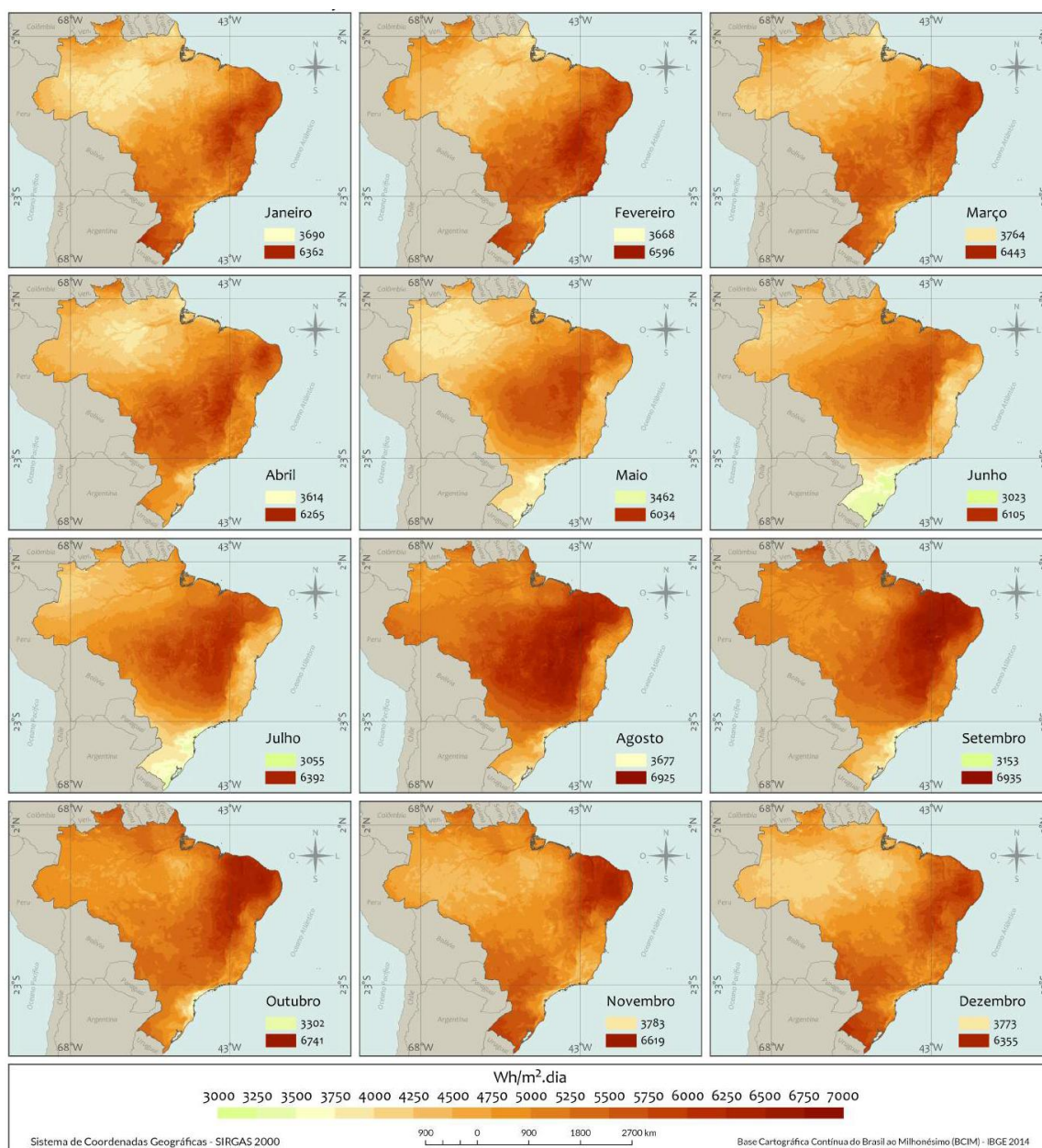


Fonte: Pinho e Galdino (2014) [11].

Segundo Mariano e Junior (2022) [12], a publicação de maior relevância no Brasil, em termos de estudo de irradiação, é o Atlas Brasileiro de Energia Solar, documento que traz os dados de irradiação com suas diversas componentes e em diferentes superfícies analisadas em todos os estados brasileiros.

A Figura 16 ilustra o mapa do Atlas Brasileiro de Energia Solar com a média mensal de cada mês do total diário de irradiação solar no ano de 2014 [13].

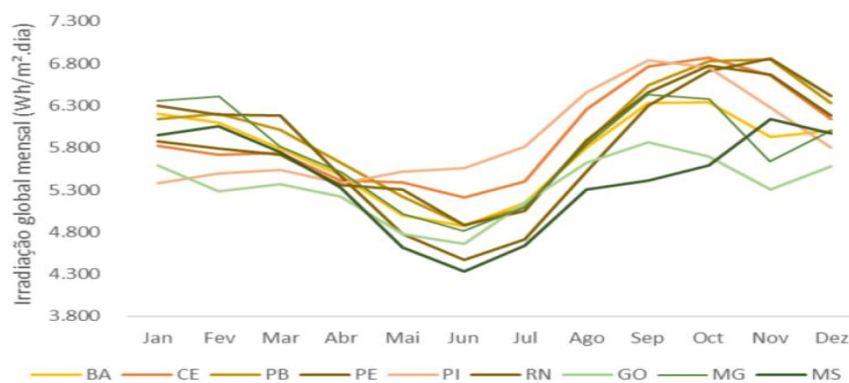
Figura 16. Total diário da irradiação no plano inclinado na latitude - médias mensais.



Fonte: INPE (2017, apud IBGE, 2014) [13].

Outra fonte possível para a obtenção desses dados é a partir dos relatórios anuais emitidos pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Na Figura 17 estão apresentados os dados de irradiação mensal em cada estado brasileiro no ano de 2022 [2].

Figura 17. Sazonalidade da irradiação por estado.



Fonte: EPE (2023) [2].

Segundo o Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB, 2018) [14], a maior referência continua sendo o Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2ª Edição, pois apresenta o que se tem de mais moderno em informações de irradiação solar no Brasil. Utilizando as informações desse atlas, o CRESESB disponibiliza o seu programa *SunData v 3.0*, que torna possível a obtenção dos dados anuais de irradiação a partir da inserção das coordenadas geográficas da região que se quer receber esta informação.

Após a inserção das coordenadas de uma região da cidade de Goiânia/GO, foram obtidos os dados de três satélites de localidades próximas das coordenadas informadas, resultando na tabela e no gráfico apresentados a seguir.

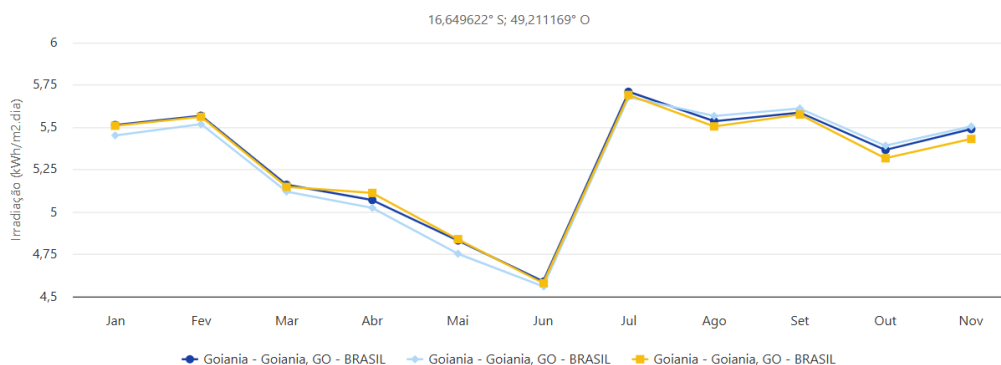
Figura 18. Irradiação solar anual na região de Goiânia/GO.

Latitude: 16,649622° S
Longitude: 49,211169° O

#	Estação	Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m².dia]																
					Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
✓	Goiania	Goiania	GO	BRASIL	16,601° S	49,249° O	6,8	5,51	5,57	5,16	5,07	4,83	4,59	4,83	5,71	5,54	5,59	5,37	5,49	5,27	1,12
✓	Goiania	Goiania	GO	BRASIL	16,701° S	49,249° O	7,0	5,45	5,52	5,12	5,02	4,75	4,56	4,78	5,68	5,57	5,61	5,39	5,51	5,25	1,12
✓	Goiania	Goiania	GO	BRASIL	16,601° S	49,149° O	8,6	5,51	5,56	5,15	5,11	4,84	4,58	4,80	5,69	5,51	5,58	5,32	5,43	5,26	1,11

Fonte: CRESESB (2018) [14].

Figura 19. Irradiação solar no plano horizontal para localidades próximas.



Fonte: CRESESB (2018) [14].

2.4 Tipos de Sistemas

2.4.1 Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFVI ou SFI)

Sistemas Fotovoltaicos Isolados são sistemas que operam de forma autônoma, ou seja, sem conexão com a rede elétrica e são comuns em regiões rurais ou remotas. Para isso, utilizam baterias para o armazenamento da energia gerada, garantindo o suprimento nos momentos que não tem o Sol disponível. São chamados de *Off-grid*, pois estão fora da rede de distribuição da concessionária.

Segundo Mariano e Junior (2022) [12], esses sistemas podem ser projetados para alimentar cargas CC, cargas mistas CC/CA, ou cargas CA. Com isso, pode-se utilizar esse tipo de sistema para alimentar tanto uma casa, através de um banco de baterias, ou para alimentar uma bomba d'água que funcionará durante o período de geração.

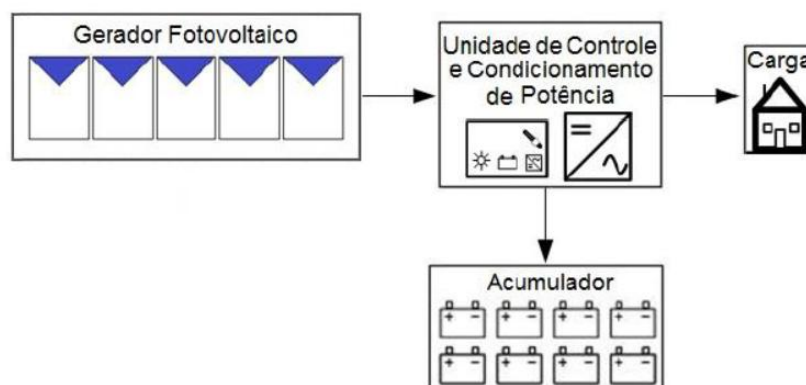
Além disso, podem ser classificados como [12]:

Individuais: quando atendem a uma residência ou a sistemas elétricos individuais;

Miniredes: quando utilizados para o abastecimento de pequenos grupos residenciais.

A Figura 20 ilustra um sistema fotovoltaico isolado.

Figura 20. Configuração básica de um Sistema Fotovoltaico Isolado – SFI.



Fonte: Pinho e Galdino (2014) [11].

Este tipo de sistema ainda não possui uma representatividade significativa no cenário comercial de SFV no Brasil, apesar de sua relevância tecnológica. Segundo o Estudo Estratégico de Geração Distribuída (EPE, 2023) [2], apenas 4% das vendas totais dos integradores de energia solar em 2024 foram de sistemas híbridos com bateria.

2.4.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFVCR ou SFCR)

Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede são os sistemas mais utilizados nas cidades. São chamados de *On-grid*, pois estão inseridos dentro da rede de distribuição da concessionária. Esses sistemas injetam o excedente de energia na rede, pois não possuem banco de baterias para armazenarem o excedente que não foi consumido.

Segundo Mariano e Junior (2022) [12], esse tipo de sistema permite a compensação de energia através do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE), regulamentado pela ANEEL. Além disso, todas as condições de operação, instalação e fornecimento são regulamentadas por normativas específicas, onde o consumidor, a concessionária e a ANEEL apresentam responsabilidades, direitos e deveres referentes à sua utilização.

Segundo Pinho e Galdino (2024) [11], esse tipo de sistema foi enquadrado pela ANEEL como micro e minigeração, regulamentados pela REN ANEEL N° 482/2012, devendo atender aos procedimentos de Distribuição (PRODIST), Módulo 3, e às normas de acesso das distribuidoras locais. Além disso, essa legislação criou os seguintes termos para o funcionamento das SFVCR:

Microgeração distribuída: se trata de uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW, e conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (PINHO; GALDINO, 2014) [11]. Após a publicação da REN ANEEL N° 687/2015, que alterou alguns artigos da REN ANEEL N° 482/2012, a potência instalada para classificar um SFV como Micro GD, passou a ser menor ou igual a 75 kW, classificação que permanece em validade até os dias atuais (ANEEL, 2015) [15].

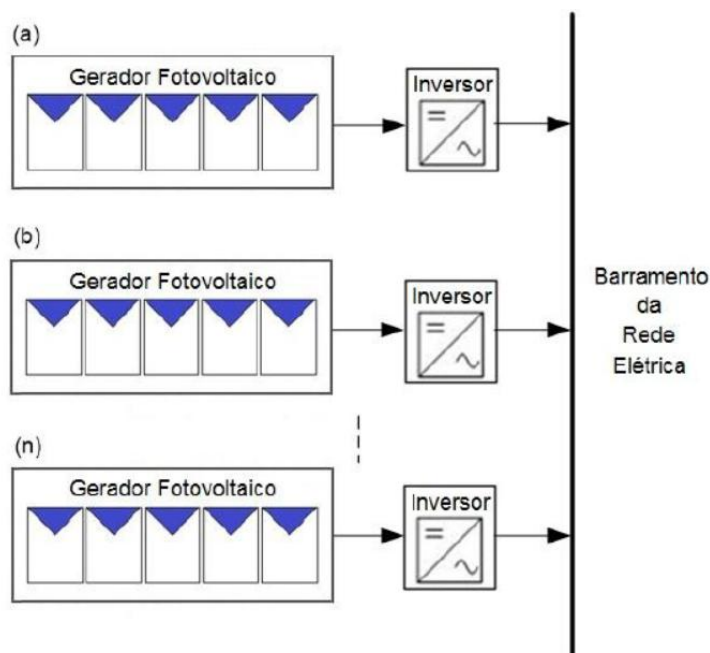
Minigeração distribuída: se trata de uma central geradora de energia elétrica, com potência instaladas superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW, e conectada a rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (PINHO; GALDINO, 2014) [11]. Após a publicação da REN ANEEL N° 687/2015, que alterou alguns artigos da REN ANEEL N° 482/2012, a potência instalada para classificar um SFV como Mini GD, passou a ser maior que 75 kW e menor ou igual a 5MW. Após a publicação da lei 14.300/2022, o limite de potência instalada para a Mini GD foi reduzido para 3MW, classificação que permanece em validade até os dias atuais (GREENER, 2025) [3].

Sistema de compensação de energia elétrica: se trata de um sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com micro ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada

com a geração de créditos que são abatidos na conta de energia da mesma unidade consumidora ou de outras que estejam na mesma titularidade.

A Figura 21 ilustra um sistema fotovoltaico conectado à rede.

Figura 21. Sistema fotovoltaico conectado à rede.



Fonte: Pinho e Galdino (2014) [11].

Nos últimos anos, a micro e minigeração distribuída (MMGD) têm desempenhado um papel de destaque, sendo uma modalidade de geração que cresce exponencialmente no país. Tem-se observado uma aceleração da inserção dos recursos energéticos gerados pelos sistemas distribuídos, isto é justificado pela redução nos custos de investimentos, pela maior disseminação das tecnologias de telecomunicação e controle e pelo papel mais ativo dos consumidores (EPE, 2024) [1].

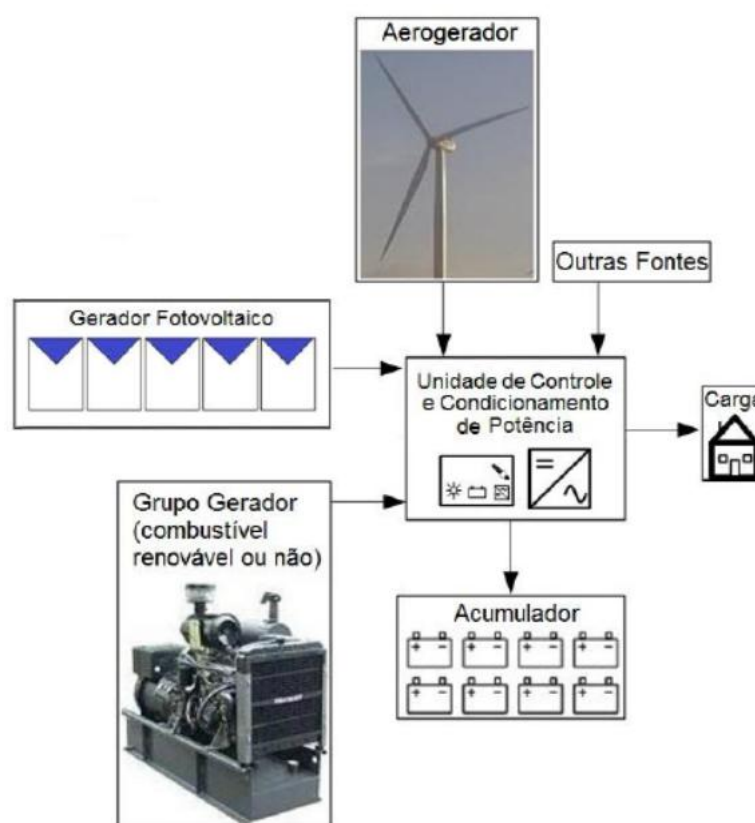
Segundo o Estudo Estratégico de Geração Distribuída (EPE, 2023) [2], o Brasil bateu o recorde anual de importação de módulos FV em 2024, com um aumento de 25% em comparação com 2023. Desses módulos importados, 77% foram destinados à Geração Distribuída (GD).

2.4.3 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFVCR ou SFCR)

Os sistemas fotovoltaicos híbridos mesclam as características dos outros sistemas de geração, podendo ser com a junção de SFVI e SFVCR e permitindo a operação tanto com a rede elétrica quanto com armazenamento local por meio de banco de baterias, ou por meio da utilização de outra fonte de geração, como por exemplo a eólica.

Segundo Mariano e Junior (2022) [12], o rápido desenvolvimento dessa tecnologia levou à inclusão mais frequente de energia solar em sistemas híbridos em comparação a outras fontes renováveis. O controle de projeto, a otimização e a operação de sistemas híbridos com duas ou mais fontes de energia são mais complexos e o risco de falha aumenta. Ela é geralmente utilizada em regiões em que apenas a geração de energia solar não é suficiente, necessitando de outra fonte que possa suprir e utilizando um dispositivo de armazenamento e um de controle para tornar o sistema mais prático, competitivo e confiável.

Figura 22. Exemplo de sistema híbrido.



Fonte: Pinho e Galdino (2014) [11].

2.4.4 Outros Tipos de Sistemas

Existem outros tipos de sistemas de geração de energia solar fotovoltaica que estão tomando espaço em nichos específicos como uma possibilidade de solução prática e barata, alguns dos principais são:

Sistemas Fotovoltaicos Integrados a Edificações (SFIE): que são sistemas instalados na própria edificação, instaladas em telhados ou fachadas, servindo não apenas como fonte de energia, mas como elementos de sombreamento e diferencial arquitetônico. Sua grande vantagem reside no fato de que a energia gerada pode ser totalmente utilizada na edificação, sem sequer sair pela rede de distribuição. No Brasil, as SFIE são enquadradas como micro ou minigeração na categoria de autoprodutores de energia (PINHO; GALDINO, 2014) [11]. A Figura 23 ilustra um exemplo de um Sistema Fotovoltaico Integrado a Edificação (SFIE).

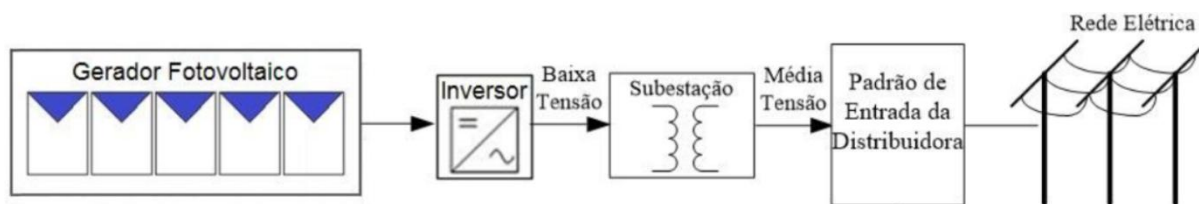
Figura 23. Exemplo de um Sistema Fotovoltaico Integrado a Edificação (SFIE).



Fonte: Portal Solar [10].

Usina Fotovoltaica (UFV): que são sistemas geralmente na casa dos MW de potência, podendo ser operados por produtores independentes e sua conexão com a rede é em geral feita em média tensão. Existem usinas com potências inferiores a 1MW, mas que também são conectadas à rede na média tensão, recebendo a nomenclatura de Usina Fotovoltaica (UFV). A Figura 24 ilustra uma UFV de grande porte. (PINHO; GALDINO, 2014) [11].

Figura 24. Sistemas de energia de grande porte.



Fonte: Pinho e Galdino (2014) [11].

2.5 Legislação e Normas Aplicáveis

A regulamentação da geração de energia solar fotovoltaica no Brasil passou por um longo processo de evolução, que possibilitou a consolidação da geração distribuída como uma opção viável e estratégica no setor elétrico nacional. Esse histórico normativo mostra a constante necessidade de adaptação às mudanças tecnológicas, à demanda social por fontes limpas e à crescente participação dos consumidores como agentes que contribuem para a oferta interna de energia elétrica. Está apresentado a seguir, em itens dispostos cronologicamente, as resoluções normativas e lei que foram elaboradas sobre o assunto.

- ANEEL - Resolução normativa (REN) N° 482, de 17 de abril de 2012: É o primeiro marco regulatório relevante elaborado pela ANEEL. Nela foi instituído o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE), a microgeração (até 100 kW) e a minigeração (até 1 MW), permitindo que consumidores pudessem injetar energia na rede elétrica e receber créditos de energia que serão abatidos posteriormente em suas contas (ANEEL, 2012) [5]. Essa normativa permitia a fixação de valores mínimos de cobrança para unidades que instalassem SCEE, porém esses valores não eram compatíveis com os custos de manutenção das redes de distribuição, o que caracterizou um período de incentivo fiscal para aquecer o mercado;

- ANEEL - Resolução normativa (REN) N° 687, de 24 de novembro de 2015: Com o aumento da adesão à geração distribuída, surgiu a necessidade de elaborar ajustes regulatórios. Sendo assim, a REN N° 687/2015 veio alterar a REN N° 482/2012 e os Módulos 1 e 3 do PRODIST. Nela foram atualizados os conceitos a potências limites de micro e minigeração, ampliando o limite da microgeração até 75 kW e os limites da minigeração até 5 MW, para fontes não hídricas, e até 3 MW para hídricas. Ademais, foram introduzidas novas modalidades de participação, como o autoconsumo remoto e a geração compartilhada, incentivando o modelo de negócio do tipo consórcio e o uso de uma única geração para diversas unidades consumidoras do mesmo titular (ANEEL, 2015) [15];

- Lei Nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022 – Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída: Com o crescimento acelerado do mercado de energia fotovoltaica no Brasil, criou-se a necessidade de uma legislação mais robusta e equilibrada. Em 2022, foi sancionada a Lei nº 14.300, que estabeleceu o Marco Legal da Micro e Minigeração Distribuída (MMGD). Essa norma consolidou os direitos adquiridos pelos consumidores, definiu regras para a cobrança escalonada da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD Fio B) e previu um período de transição até 2045. Segundo a legislação, a estabilidade regulatória e a segurança jurídica são pilares para o incentivo às novas instalações (BRASIL, 2022) [8].

- ANEEL - Resolução normativa (REN) Nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023: Em complemento à lei 14.300/2022, a ANEEL publicou a REN Nº 1.059/2023, que detalha os procedimentos de acesso à rede, faturamento e compensação de energia para sistemas de MMGD. A resolução também introduziu regras para usinas com capacidade de despacho remoto, exigindo, por exemplo, a presença de sistemas de armazenamento com no mínimo 20% da geração média mensal (ANEEL, 2023) [16].

Do ponto de vista técnico, foi necessário a atribuição de normas técnicas que regessem os padrões esperados de um SFV e estipulassem níveis de segurança para as instalações, operações e manutenção desses sistemas. Está apresentado a seguir, em itens dispostos cronologicamente, os principais documentos técnicos de referência.

- ABNT NBR 5410:2004: Esta é a principal referência que trata das instalações elétricas de baixa tensão. Nela são estabelecidas as condições que essas instalações devem satisfazer, sendo, portanto, essencial para garantir a segurança das instalações fotovoltaicas na parte CA, abordando questões como proteção contra choques elétricos, sobrecorrentes, sobretensões e seccionamento (ABNT, 2004) [17].

- ABNT NBR 16690:2019: Adicionalmente, a NBR 16690:2019 foi oficialmente publicada após anos de consulta pública. Essa norma é voltada especificamente às instalações de arranjos fotovoltaicos, definindo requisitos para projeto, seleção de componentes, proteções elétricas e desempenho dos sistemas. Nela também estão incluídas todas as partes do arranjo fotovoltaico até, mas não incluindo, os dispositivos de armazenamento de energia, as unidades de condicionamento de potência ou as cargas (ABNT, 2019) [7]. Uma das mais importantes características dessa normativa foi a definição técnica de parâmetros de segurança para a operação da parte CC do sistema fotovoltaico.

A Nota Técnica EPE DEA-SEE 007/2023 (EPE, 2023) [2], cria e descreve a metodologia que foi utilizada no Modelo de Mercado da Micro e Minigeração Distribuída

(4MD), com o objetivo de estimular a pesquisa no campo das projeções de geração distribuída e de receber contribuições acerca da metodologia utilizada. Nela é destacado a relevância da MMGD no planejamento energético nacional, incorporando sua evolução ao Modelo de Mercado da Micro e Minigeração Distribuída (4MD). Além disso, a nota detalha a metodologia utilizada para a estimação do mercado, da difusão e do potencial de crescimento que a GD possui nos próximos anos de 2023 a 2027.

O estudo “Cadeia de Valor da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil” do SEBRAE (2018) [4], destaca o papel das legislações iniciais (especialmente a REN 482/2012 e a REN 687/2015) na popularização da geração distribuída entre pequenos empreendedores e produtores rurais. Nele é abordado como o marco regulatório permitiu que pequenos negócios tivessem acesso a um modelo de geração mais acessível, descentralizado e com previsibilidade de retorno, ampliando a implementação da energia solar além dos grandes centros urbanos.

Já o “Estudo Estratégico Geração Distribuída” da GREENER (2025) [3] traz uma abordagem a respeito dos efeitos da Lei 14.300/2022 e da REN 1.059/2023 no comportamento do mercado e na expectativa dos investidores. No estudo é apontado que, apesar do avanço regulatório e da maior segurança jurídica trazida pelo marco legal, o setor ainda enfrenta desafios de adaptação às novas regras, especialmente no que diz respeito à cobrança progressiva da TUSD Fio B. A Greener também destaca uma concentração regional dos investimentos e uma tendência de profissionalização dos integradores, mostrando que a legislação estimulou tanto a formalização do mercado quanto a consolidação de empresas mais estruturadas.

Em resumo, a legislação e as normas aplicáveis à energia solar fotovoltaica no Brasil têm evoluído de forma significativa, garantindo um ambiente regulatório seguro e atrativo para novos investimentos. Essa evolução tem sido fundamental para a ampliação da participação da energia solar na matriz elétrica nacional e para a consolidação de modelos de negócio baseados em SFV's como soluções sustentáveis e economicamente atrativas.

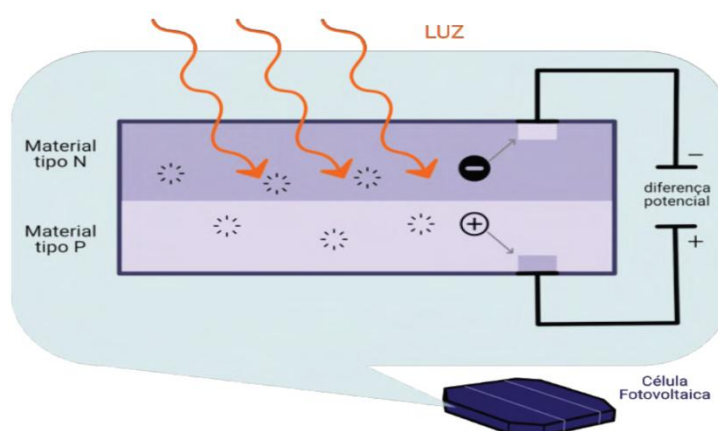
3 COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO (SFV)

Os sistemas fotovoltaicos são compostos por diversos equipamentos que atuam de forma complementar na conversão da energia solar em energia elétrica que possa ser utilizada. Cada componente possui especificações técnicas e funções essenciais à eficiência e segurança da instalação. A seguir, serão apresentados os principais elementos constituintes de um sistema fotovoltaico.

3.1 Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos, que são compostos por células fotovoltaicas interligadas umas nas outras, são responsáveis pela transformação da radiação solar em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. Está apresentado na Figura 25 uma representação do efeito fotovoltaico em células fotovoltaicas.

Figura 25. O efeito fotovoltaico e a célula fotovoltaica.



Fonte: Mariano e Junior (2022) [12].

Segundo a NBR 10899: (ABNT, 2006) [18]: Célula Fotovoltaica é um dispositivo elementar especificamente desenvolvido para realizar a conversão direta de energia solar em energia elétrica; Módulo Fotovoltaico é a unidade básica formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica; e Painel Fotovoltaico é um ou mais módulos fotovoltaicos interligados eletricamente, montados de modo a formar uma única estrutura.

A Figura 26 ilustra a hierarquia fotovoltaica.

Figura 26. Hierarquia fotovoltaica.

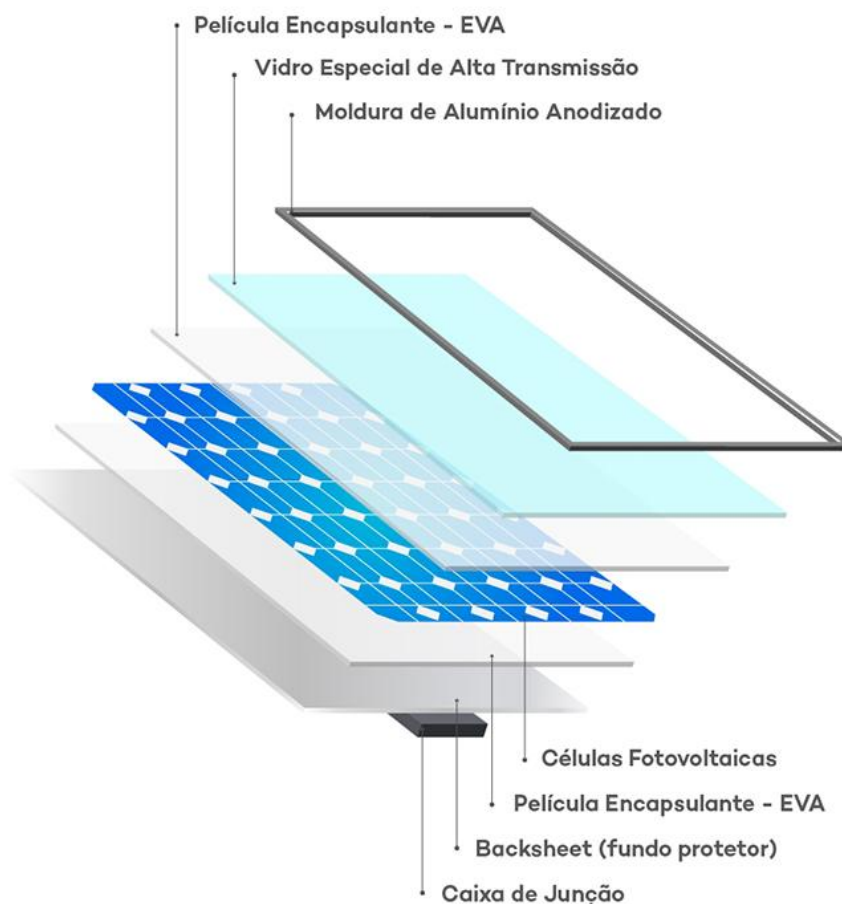


Fonte: Mariano e Junior (2022) [12].

Além de compor a interligação de células fotovoltaicas, o módulo tem ainda a função de proteger as células das intempéries, isolar elas eletricamente de contatos externos e fornecer rigidez mecânica ao conjunto. Ele é constituído por um vidro temperado na cobertura frontal, por um material encapsulante isolante, pelas células, que estão interligadas por tiras metálicas, cobertura de polifluoreto de vinila na parte traseira, estrutura metálica que segura todo o conjunto e por uma caixa de conexões elétricas (Mariano e Junior, 2022) [12].

A Figura 27 ilustra a composição de um módulo fotovoltaico.

Figura 27. Componentes do módulo fotovoltaico.



Fonte: Neo Solar (2025) [19].

Em relação à composição das células FV, Mariano e Junior (2022) [12] classificam os tipos de módulos da seguinte forma:

Módulo de silício monocristalino (m-Si): é o módulo que, no processo de fabricação, é utilizado um único cristal de silício ultrapuro, sendo a tecnologia mais custosa dentre todas. O Silício monocristalino apresenta uma coloração mais azul escuro devido ao seu grau de pureza. Necessitam de menos espaço por oferecerem uma potência maior por metro quadrado.

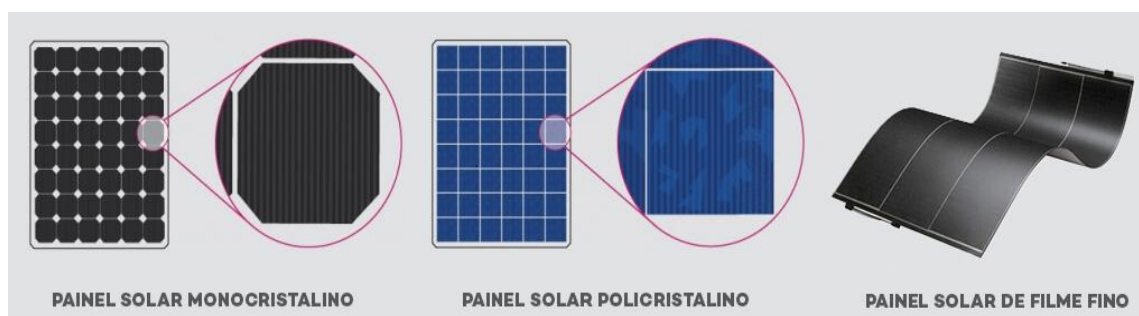
Módulo de silício policristalino (p-Si): é o módulo que, no processo de fabricação, utiliza o método de fundição dos cristais, onde cristais de silício são fundidos em um bloco, é cortado e fatiado, sendo possível observar a formação múltipla de cristais. As células apresentam uma coloração mais azul claro que o monocristalino. Necessitam de mais espaço por oferecerem uma potência menor por metro quadrado.

Módulo fotovoltaico de filmes finos: é o módulo que apresenta sua principal característica quanto a sua aplicação, pois podem vir em substratos rígidos ou flexíveis. Pode ser composto por células fotovoltaicas de película fina (TFPV), filmes finos de silício ou outros materiais. Devido à sua característica de serem flexíveis, isto lhes abrem uma enorme gama de aplicações.

Outros tipos de módulos: outras soluções de módulos fotovoltaicos, que são menos utilizadas, mas que estão disponíveis no mercado são o Módulo de silício amorfo (a-Si), possuindo uma produção de energia elétrica baixa; Módulo de Telureto de Cádmio (CdTe), que possuem uma eficiência similar aos módulos de silício cristalino; Módulo de disseleneto de cobre, índio e gálio (CIS, CIGS), que mostram o maior potencial em termos de eficiência; e Módulo de células orgânicas (OPV), que utilizam polímeros orgânicos impressos para a produção de energia.

A Figura 28 ilustra os tipos mais convencionais de módulos fotovoltaicos.

Figura 28. Tipos mais comuns de Módulos Fotovoltaicos.

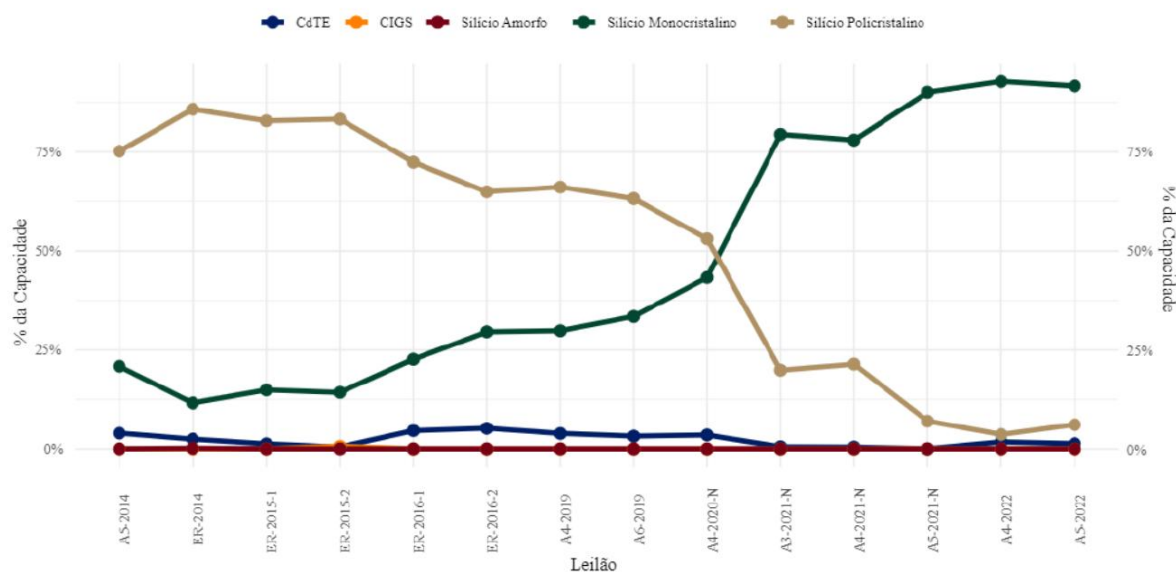


Fonte: Neo Solar (2025) [19].

Em relação aos tipos de módulos, o Caderno de Tecnologias de Geração (EPE, 2023) [2] cita o surgimento de módulos bifaciais, que possuem vidro também na parte de trás deles e são constituídos de células capazes de converter a energia solar em ambas as faces.

Está apresentado na Figura 29 a participação das diferentes tecnologias de módulos ao longo dos anos em leilões públicos levantados pelo órgão. Pode-se notar um significativo crescimento na escolha dos integradores por módulos de silício monocristalino.

Figura 29. Participação das tecnologias de módulos fotovoltaicos.



Fonte: EPE (2023) [2].

Em relação aos parâmetros característicos a serem avaliados nos módulos, Mariano e Junior (2022) [12] destacam:

Massa de Ar (AM): é a razão entre o caminho ótico percorrido pelos raios solares na atmosfera e o caminho vertical na direção de zênite ao nível do mar;

Condições-padrão para ensaio - “Standard Test Conditions” (STC): são as condições padrão de teste, sendo elas a temperatura de junção da célula de 25°C, a irradiância total de 1000W/m² normal à superfície de ensaio, e o espectro solar para AM 1,5;

Tensão de Circuito Aberto (Voc): é a tensão gerada por um conversor fotovoltaico com a saída aberta, para valores preestabelecidos de temperatura e irradiância total;

Corrente de Curto-Circuito (Isc): é a corrente de saída de um conversor fotovoltaico, na condição de curto-circuito, e para valores preestabelecidos de temperatura e irradiância total;

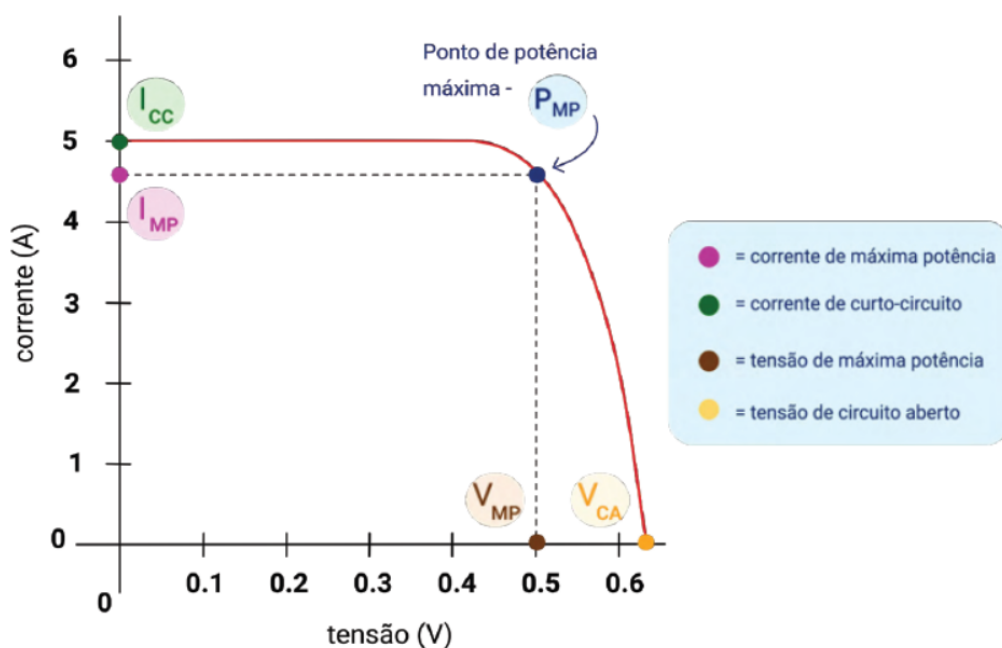
Curva característica ou Curva I-V: é a representação dos valores da corrente de saída de um conversor fotovoltaico, em função da sua tensão de saída, para condições preestabelecidas de temperatura e de irradiância total.

Potência Nominal de um Módulo (P_{NOM}): é o valor de potência que o módulo fornece nas condições-padrão de ensaio (STC) e é especificado na etiqueta pelo fabricante. Corresponde ao Ponto de Potência Máxima (PMP), nas STC.

Fator de Forma (FF): é a razão entre a potência máxima (P_{MP}) e o produto da tensão de circuito aberto (V_{OC}) pela corrente de curto-circuito (I_{SC}), especificada na forma de porcentagem.

A Figura 30 apresenta a Curva I-V de uma célula fotovoltaica com os parâmetros de tensão, corrente e potência.

Figura 30. Representação do ponto de máxima potência.



Fonte: Mariano e Junior (2022) [12].

Outros parâmetros fundamentais de serem mencionados são:

Temperatura Nominal de Operação (NOCT): que é uma temperatura nominal definida pela fabricante em que as células operam com as características elétricas próximas das características efetivas verificadas em campo (PINHO; GALDINO, 2014) [11].

Eficiência (η): que é o parâmetro que define o quão efetivo vai ser a transformação da energia solar em energia elétrica (PINHO; GALDINO, 2014) [11]. Mariano e Junior (2022) [12] dividem esse parâmetro em três tipos, sendo o primeiro a Eficiência de conversão (η), que é a relação entre a Potência obtida na saída do conversor (P_o) e a Potência da radiação solar incidente sobre a área do conversor (P_i); a Eficiência de conversão de célula ou módulo ($\eta\%$), que é a razão entre a potência máxima fornecida pela célula e o produto da área da célula, pela irradiância total; e a Eficiência de conversão, que é a eficiência de conversão conforme as especificações do fabricante do módulo de acordo com cada tecnologia.

A equação para o cálculo da Eficiência de conversão de célula ou módulo ($\eta\%$) é dada por (MARIANO; JUNIOR, 2022) [12]:

$$\eta(\%) = \frac{P_{MP}}{(A_{MT} \cdot ou. A_{CT}) G_{TOT}} \cdot 100\% \quad \text{Eq. 3}$$

sendo, A_{MT} a área total do módulo e A_{CT} a área total da célula.

O Caderno de Tecnologias de Geração (EPE, 2023) [2] destaca que a eficiência dos sistemas fotovoltaicos tem evoluído consideravelmente, alcançando valores superiores a 20% nos módulos comerciais mais modernos. Essa eficiência está diretamente relacionada à qualidade dos materiais utilizados e à tecnologia de fabricação das células fotovoltaicas.

Em termos de associações, de acordo com Pinho e Galdino (2014) [11], na associação em série as tensões são somadas e a corrente elétrica não é afetada, enquanto na associação em paralelo as correntes elétricas são somadas e a tensão não é afetada. Isto vale tanto para células fotovoltaicas como para módulos.

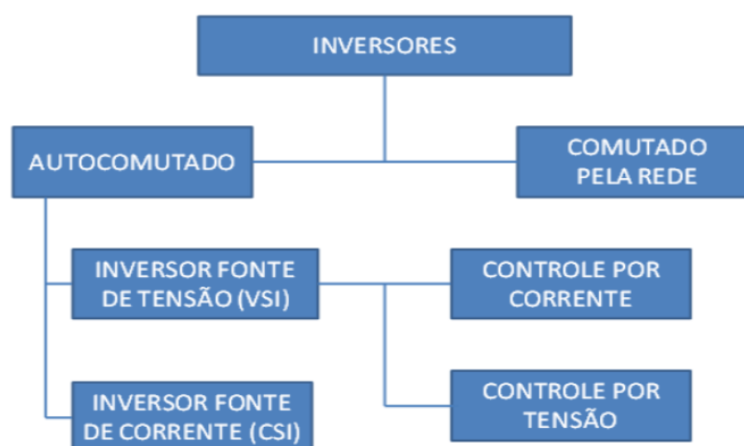
Por fim, deve-se abordar os efeitos que parâmetros externos aos sistemas podem causar. Para isso, Pinho e Galdino (2014) [11] citam que o desempenho das células fotovoltaicas é influenciado pela irradiância e pela temperatura, sendo que em condições de concentração de radiação solar, o que aumentaria a irradiância, a eficiência das células pode aumentar, controlando-se a temperatura. Já em relação à temperatura, Mariano e Junior (2022) [12] citam que quanto maior a temperatura de operação do módulo, maiores são as correntes, mas menores são as tensões, o que interfere na potência de operação que pode ser reduzida.

3.2 Inversores

Os inversores utilizados nos sistemas fotovoltaicos transformam a corrente contínua gerada pelos módulos, em corrente alternada compatível com a rede elétrica.

Os inversores fotovoltaicos podem ser classificados de acordo com o tipo de aplicação em SFI's e SFCR's, ou conforme o princípio de funcionamento, em comutados pela rede ou autocomutados. Este último caso, está ilustrado na Figura 31 [11].

Figura 31. Tipos de inversores classificados de acordo com o princípio de funcionamento.



Fonte: Pinho e Galdino (2014) [11].

Inversores Comutados pela rede (comutação natural): utilizam tiristores como os principais dispositivos semicondutores de chaveamento e dependem da presença da rede elétrica para a comutação. São simples de construir e capazes de suportar altas potências (acima de 100kW), porém produzem um sinal de saída com alta distorção harmônica, o que gera custos com a utilização de filtros para reduzir essas distorções (PINHO; GALDINO, 2014) [11].

Inversores autocomutados (comutação forçada): utilizam dispositivos semicondutores como *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor* (MOSFET) e *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) que podem ser controlados para entrar e sair do estado de condução a qualquer instante do ciclo de operação, tendo assim um maior controle da forma de onda na saída. Podem ser por fonte de corrente ou por fonte de tensão, sendo o último mais comum para sistemas fotovoltaicos. Estes inversores apresentam uma melhor eficiência e apresentam uma maior estabilidade perante perturbações na rede, porém possuem um custo superior aos comutados pela rede e necessitam de um controle maior para garantir o

funcionamento adequado (PINHO; GALDINO, 2014) [11]. Este tipo de inversor é o mais utilizado nos sistemas fotovoltaicos.

Algumas características de operação desses inversores precisam ser consideradas para garantir o adequado dimensionamento e proteção do sistema fotovoltaico. Estas características variam de acordo com a utilização do equipamento, diferenciando entre Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFI) e Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR). Devem ser consideradas as seguintes características [11]:

I. **Forma de onda e Distorção harmônica:** a forma de onda da tensão CA deve ser senoidal pura e a distorção harmônica total (THD) deve ser inferior a 5% em qualquer potência de operação;

II. **Eficiência na conversão de potência:** é a relação entre a potência de saída e a potência de entrada do inversor. Pode variar na faixa de 50% a 95%, sendo possível diminuir quando estão funcionando abaixo da potência nominal;

III. **Eficiência europeia:** no intuito de facilitar a comparação entre diferentes inversores, foi criada a eficiência europeia. Trata-se de uma média ponderada da eficiência do inversor para diversas condições de carregamento e de acordo com uma distribuição determinada para o clima europeu;

IV. **Potência Nominal de saída:** indica a potência que o inversor pode prover à carga em regime contínuo;

V. **Potência de surto:** indica a capacidade do inversor de ultrapassar sua potência nominal por um certo período. Aplicado apenas para SFI's;

VI. **Tensão de entrada:** é a tensão CC do inversor. Para SFI's no Brasil, esses valores são 12V, 24V e 48V em conformidade com as baterias, já para SFCR's, esses valores compõem uma faixa de operação que depende da associação de módulos em série;

VII. **Tensão de saída:** para SFCR's, no Brasil, são usados valores entre 127V ou 220V para inversores monofásicos e 220V ou 380V para inversores trifásicos. Esses valores são atendidos em baixa tensão (BT) para potências de até 100kW, enquanto para potências

superiores a 1 MW, a tensão de saída deve ser em média tensão (MT). Para SFI's, depende da tensão de operação das cargas;

VIII. **Frequência da tensão de saída:** indica a frequência da tensão CA na saída de inversores, que no Brasil operam na faixa de 60Hz;

IX. **Fator de potência:** os melhores inversores são fabricados para manter o fator de potência próximo de 1;

X. **Consumo de potência sem carga (consumo permanente, autoconsumo, consumo em *standby*):** é a potência que o inversor utiliza mesmo quando não há carga sendo alimentada;

XI. **Temperatura e umidade do ambiente:** deve-se citar a temperatura ambiente e a umidade máxima de operação, para definir assim as proteções necessárias. Além disso, a temperatura ambiente de operação sempre influencia na eficiência do inversor, o que requer a definição das características do ambiente em que estes equipamentos serão instalados para garantir uma boa ventilação que seja suficiente para a dissipação do calor por convecção natural;

XII. **Modularidade:** o uso de múltiplos inversores torna-se muito vantajoso em alguns sistemas, podendo ser conectados em paralelo;

XIII. **Grau de proteção:** o grau de proteção IP (*Ingress protection*) classifica e avalia o grau de proteção de pessoas contra o contato com partes energizadas sem isolamento; de proteção contra o contato com as partes móveis do interior do invólucro; de proteção contra a entrada de corpos estranhos; e de proteção contra a entrada de poeira e contato acidental com água em carcaças mecânicas e invólucros elétricos.

Além disso, outra classificação para inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos precisa ser definida em relação ao tipo do inversor. Nos itens a seguir serão apresentados os diferentes tipos de inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos.

Inversores de *string*: inversores desse tipo permitem que vários módulos fotovoltaicos sejam ligados em conjuntos séries ou paralelo, formando arranjos fotovoltaicos ou, em inglês, *strings* (AYRÃO, 2018) [20]. Podem ser divididos em:

Inversores centrais: inversores trifásicos de grande porte, com potência que chegam até a casa dos MWp, utilizados em UFV's (PINHO; GALDINO, 2014) [11]. A Figura 32 ilustra um inversor central.

Figura 32. Inversor solar central.



Fonte: FAS Energia Solar (2025) [21].

Inversores *Multistring*: inversores monofásicos ou trifásicos, com potências na casa das dezenas de kWp, e com diversas entradas para conexão de fileiras (*strings*) de módulos, sendo que cada *string* pode ser submetida a diferentes condições de irradiância e sombreamento (PINHO; GALDINO, 2014) [11]. Visando maximizar a geração de energia, esses inversores possuem uma função chamada de rastreador do ponto de potência máxima, ou, em inglês, *Maximum Power Point Tracker* (MPPT), que operam nas entradas das *strings* (AYRÃO, 2018) [20]. Um inversor multistring está apresentado na Figura 33.

Figura 33. Inversor multistring.



Fonte: Energia Total (2025) [22].

Inversores de uma *String*: inversores monofásicos dotados de apenas uma entrada de *string*, sendo utilizados em micro usinas residenciais (PINHO; GALDINO, 2014) [11];

Inversores com tecnologia *Module Level Power Electronics (MLPE)*: podem ser do tipo micro inversores ou inversores com otimizadores de potência (AYRÃO, 2018) [20].

Micro inversores: segundo a NBR 16690:2019 (ABNT, 2019) [7], são inversores onde cada entrada em corrente contínua está associada a um único MPPT, podem também ser associados a apenas um módulo fotovoltaico. A Figura 34 ilustra um micro inversor.

Figura 34. Micro inversor.



Fonte: FAS Energia Solar (202) [21].

Inversores com otimizadores de potência: nos inversores que utilizam otimizadores, a função do MPPT não é realizada pelo inversor, mas sim pelo otimizador. Esses otimizadores são ligados em série e/ou paralelo antes da ligação com o inversor. Dessa forma, cada módulo trabalha em seu ponto de máxima potência individualmente, garantindo o máximo de geração (AYRÃO, 2018) [20]. Um otimizador de potência está apresentado na Figura 35.

Figura 35. Otimizador de potência.



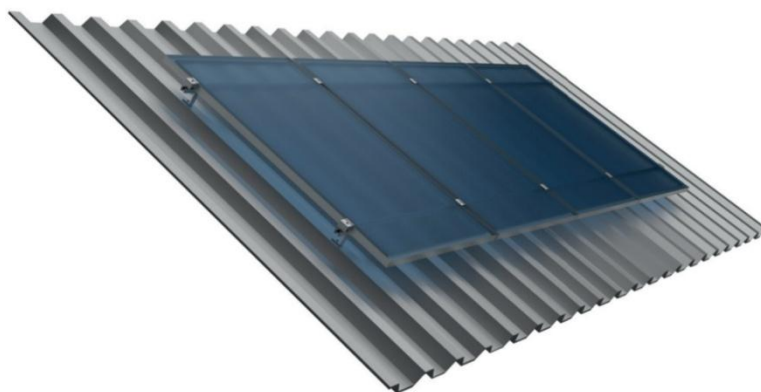
Fonte: Solaredge (2025) [23].

3.3 Estruturas de Suporte

As estruturas de suporte são utilizadas para fixar os módulos fotovoltaicos nas diversas superfícies em que eles podem ser instalados, como no solo, sobre o telhado, em fachada, entre outras. Elas devem suportar cargas de vento, dilatações térmicas, peso dos módulos e resistir à corrosão. Sobre o assunto, Pinho e Galdino (2014) [11] afirmam que essas estruturas devem ser rígidas, ajustáveis e compatíveis com a inclinação ótima de captação solar.

As figuras 36-41 ilustram os diferentes tipos de estruturas de suporte disponíveis no mercado.

Figura 36. Estrutura de fixação em coberturas com telhas metálicas.



Fonte: ROMAGNOLE Produtos Elétricos S.A. (2018) [24].

Figura 37. Estrutura de fixação em coberturas com telhas cerâmicas.



Fonte: ROMAGNOLE Produtos Elétricos S.A. (2018) [24].

Figura 38. Estrutura de suporte do tipo Carport para utilização em estacionamentos.



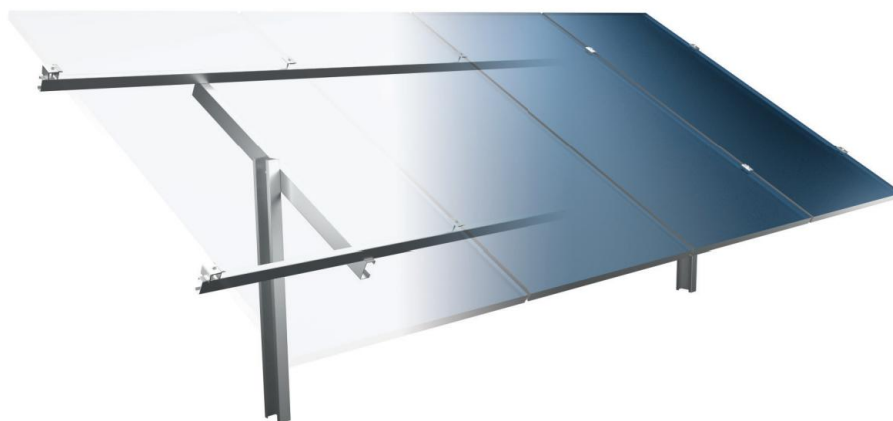
Fonte: ROMAGNOLE Produtos Elétricos S.A. (2018) [24].

Figura 39. Estrutura de fixação em lajes de concreto armado.



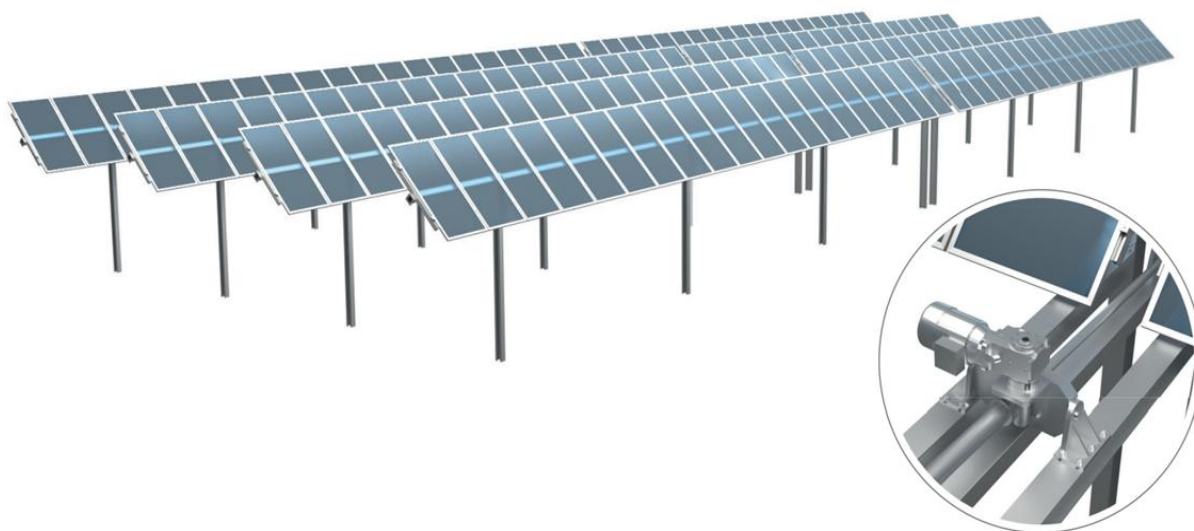
Fonte: ROMAGNOLE Produtos Elétricos S.A. (2018) [24].

Figura 40. Estrutura de fixação no solo.



Fonte: ROMAGNOLE Produtos Elétricos S.A. (2018) [24].

Figura 41. Estrutura de fixação no solo com a utilização da tecnologia de Trackers.



Fonte: ROMAGNOLE Produtos Elétricos S.A. (2018) [24].

Em relação à utilização, a Figura 36 apresenta uma estrutura de suporte em telhas metálicas, muito utilizadas em SFV's comerciais e industriais; a Figura 37 apresenta uma estrutura de suporte em telhas cerâmicas, muito utilizadas em SFV's residenciais; a Figura 38 apresenta um tipo de estrutura adaptado para aproveitar espaços dedicados a estacionamentos e garagens, chamado de Carport; a Figura 39 apresenta uma estrutura de fixação em lajes de concreto armado, muito utilizadas em lajes de edifícios residenciais e comerciais; a Figura 40 apresenta uma estrutura de fixação dos módulos diretamente no solo, sendo muito utilizadas em SFV's rurais; e a Figura 41 apresenta uma estrutura de solo com a tecnologia de MPPT Trackers, que acompanham o movimento do sol durante o dia de geração, garantindo sempre uma incidência de raios solares ideal de 90° com a superfície do módulo.

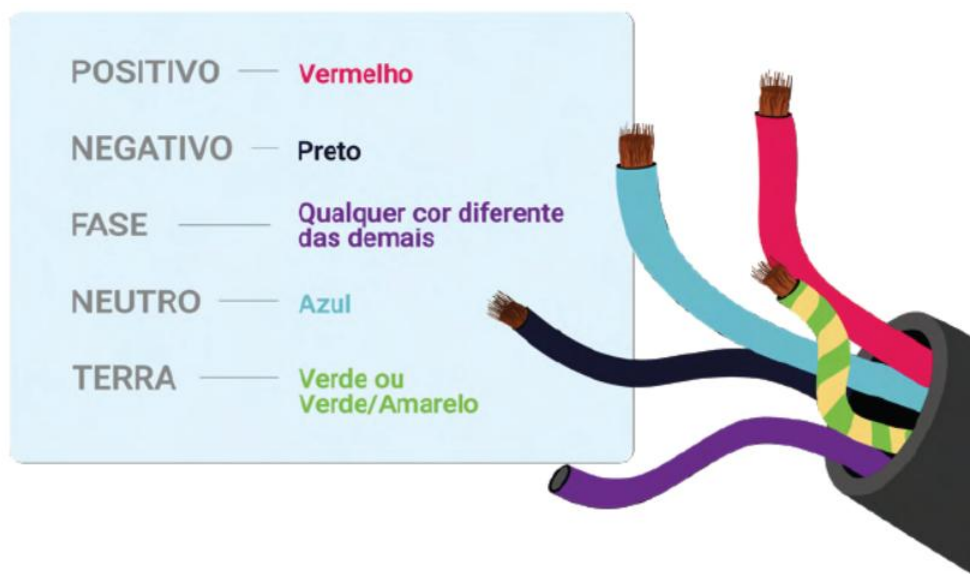
Segundo EPE (2023) [2], nos últimos anos o uso de rastreamento em UFV's tem contribuído para atingir fatores de capacidade mais elevados, com produções de energia mais constante ao longo do dia, mas necessitando de maior quantidade de área para instalação da usina.

A NBR 16690:2019 – Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos – requisitos de projeto, apresenta alguns requisitos mínimos necessários para a utilização das estruturas de suporte, como aspectos térmicos esperados, cargas mecânicas nas estruturas, forças devidas ao vento, acúmulos de materiais, corrosão e radiação UV (ABNT, 2019) [7].

3.4 Cabeamento e Conectores

Sobre os cabeamentos utilizados em SFV's, os condutores expostos a radiação ultravioleta (UV) devem possuir especificação adequada ou serem protegidos em eletrodutos com proteção a UV; também devem ser dimensionados para queda de tensão de no máximo de 4% (MARIANO; JUNIOR, 2022) [12]. A Figura 42 ilustra o padrão de cores utilizado para identificação dos cabos.

Figura 42. Padrão de cores para cabos.



Fonte: .Mariano e Junior (2022) [12].

Sobre o padrão de cores, a NBR 5410:2004 – Instalações elétricas de baixa tensão, padronizam as cores, facilitando assim a instalação e manutenção dos diferentes condutores (ABNT, 2004). Além disso, o cabeamento deve atender aos critérios de segurança, resistência térmica e isolamento elétrico. A norma NBR 16690:2019 exige cabos certificados com marcação “cabo para sistema fotovoltaico” e conectores apropriados para corrente contínua do tipo MC4 (ABNT, 2019) [7].

Para os demais cabos utilizados em área que não estão expostas a intempéries, o indicado é seguir as definições normativas da NBR 5410:2004 e NBR 5471:1986.

3.5 Dispositivos de Proteção e Seccionamento

Os sistemas fotovoltaicos precisam de dispositivos extras que forneçam proteções para a sua adequada operação, como, por exemplo, as proteções contra sobrecorrentes, contra surtos, contra arcos elétricos e contra choques elétricos. Os principais dispositivos utilizados para esse fim são: os disjuntores, fusíveis, chaves seccionadoras, dispositivos de Proteção Contra Surtos (DPS), e Interruptor Diferencial Residual (IDR).

Segundo a NBR 5410:2004 (ABNT, 2004) [17], os principais dispositivos são:

Disjuntor: é um dispositivo de manobra capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes em condições normais de circuito, bem como estabelecer, conduzir por um tempo especificado e interromper correntes em condições anormais, como durante curtos-circuitos. A proteção contra curto-circuito desse dispositivo é feita de forma automática, a sua função principal é de proteção e manobra, e ele detecta a sobrecorrente. A Figura 43 ilustra um Disjuntor Tripolar da fabricante Schneider Eletric.

Figura 43. Disjuntor Tripolar Schneider Eletric.



Fonte: SCHNEIDER Electric Brasil Ltda (2021) [25].

Fusível: é um dispositivo projetado para interromper o circuito elétrico quando a corrente excede um valor determinado por um tempo suficiente, protegendo assim os equipamentos e condutores contra sobrecorrentes. Um fusível está ilustrado na Figura 44.

Figura 44. Fusível solar THS.



Fonte: THS Indústria e Comércio de Componentes Elétricos Ltda (2022) [26].

Chave Seccionadora: é um dispositivo de manobra capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes em condições normais de circuito, incluindo condições de sobrecarga especificadas, e de estabelecer, conduzir por um tempo especificado e interromper correntes

em condições anormais, como durante curtos-circuitos. A proteção contra curto-circuito desse dispositivo não é feita de forma automática, a sua função principal é de isolamento do circuito, e ele não detecta a sobrecorrente. A Figura 45 ilustra uma chave seccionadora da fabricante SIBRATEC.

Figura 45. Chave seccionadora SIBRATEC.



Fonte: SIBRATEC Indústria e Comércio de Materiais Elétricos Ltda. (2022) [27].

Dispositivo de Proteção Contra Surtos (DPS): é um dispositivo destinado a proteger instalações elétricas e equipamentos conectados contra sobretensões transitórias, desviando as correntes de surto para a terra e limitando a tensão que aparece entre os terminais do equipamento protegido. A Figura 46 ilustra um dispositivo de proteção contra surtos da fabricante Clamper.

Figura 46. Dispositivo de proteção contra surtos Clamper.



Fonte: CLAMPER Indústria e Comércio S.A. (2015) [28].

Interruptor Diferencial Residual (IDR): que são dispositivos de seccionamento mecânico destinados a provocar a abertura de contatos quando a corrente diferencial entre fase e neutro atinge um valor dado em condições específicas. A Figura 47 ilustra um interruptor diferencial residual tripolar da fabricante Schneider Eletric.

Figura 47. Interruptor diferencial residual tripolar Schneider Eletric.



Fonte: SCHNEIDER Electric Brasil Ltda (2021) [25].

De acordo com Pinho e Galdino (2014) [11], nos dispositivos inversores mais modernos, algumas proteções vêm embutidas internamente, sendo geralmente fornecidas no lado CC do dispositivo. As principais proteções que os inversores possuem internamente são:

Sobretensão na entrada CC: a maioria dos inversores possuem sensores que interrompem o circuito se os limites de tensão CC especificados forem excedidos;

Inversão de polaridade na entrada CC;

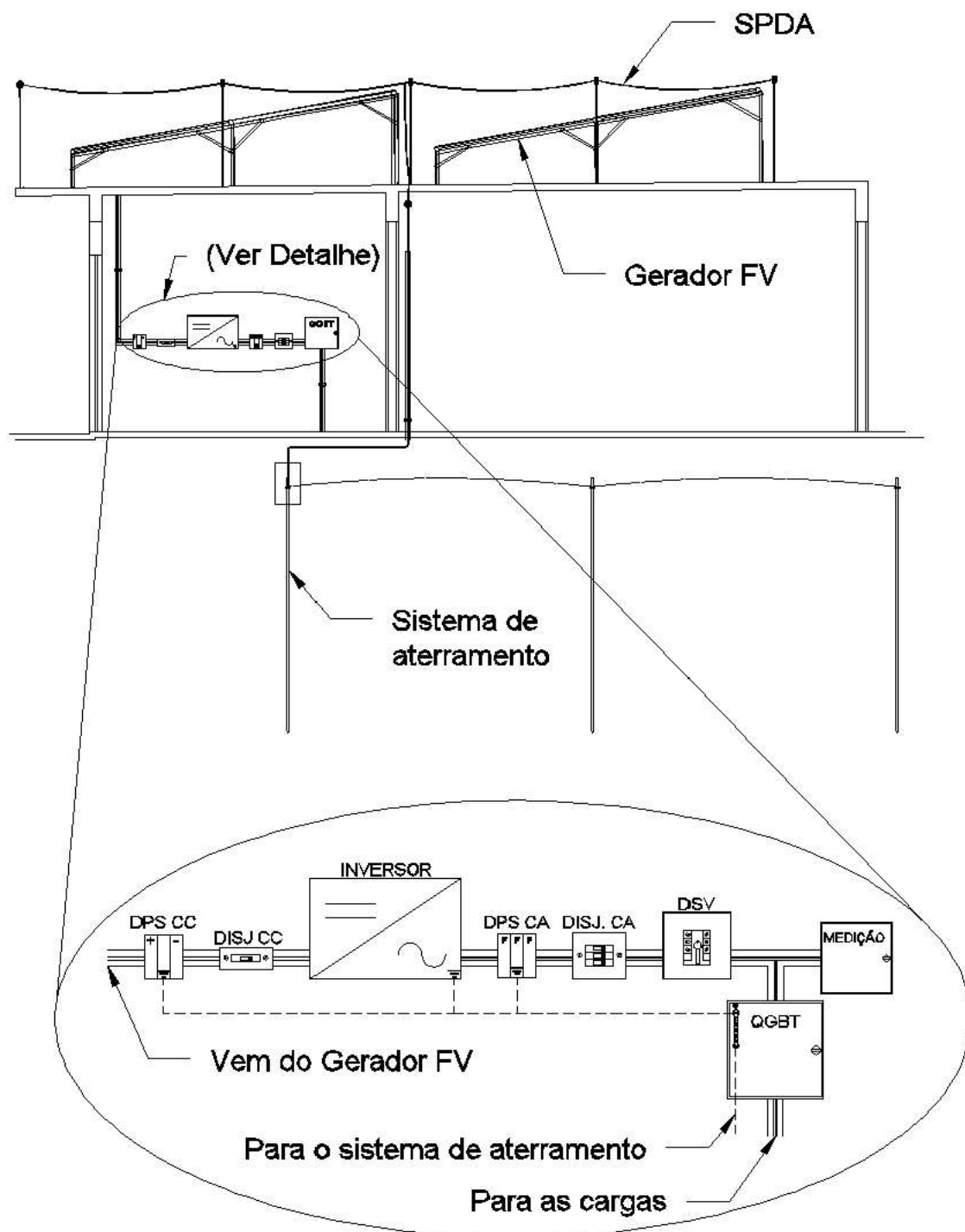
Curto-circuito na saída CA;

Sobrecargas e elevação de temperatura: outro tipo de proteção são os controles que permitem desligar o dispositivo caso as cargas impostas a ele se excederem ou se ele ultrapassar a temperatura de operação limite estabelecida.

O correto dimensionamento e utilização dos dispositivos de proteção contribuem para minimizar ou até mesmo eliminar as falhas. Além dos dispositivos de proteção integrados aos equipamentos, deve ser prevista a instalação de dispositivos de proteção externos (PINHO; GALDINO, 2014) [11].

A Figura 48 ilustra um esquema de instalação típica de dispositivos de proteção para um SFVCR, que também pode ser aplicado a um SFVI.

Figura 48. Desenho de uma instalação típica de dispositivos de proteção para um SFCR,



Fonte: Pinho e Galdino (2014) [11].

Quando o inversor a ser utilizados não possui as proteções CC necessárias embutidas no dispositivo, outro equipamento auxiliar desempenha este papel, a String Box. Ela protege a instalação e os módulos fotovoltaicos contra descargas elétricas, sendo geralmente constituídas por chaves seccionadores e DPS's de corrente contínua (SEBRAE, 2018) [4]. A Figura 49 ilustra um modelo de strig box muito utilizado para UFVCR's.

Em relação aos micros inversores, a normativa brasileira NBR16690:2019 e a internacional IEC 62548, dispensam o uso de seccionadores e proteções no lado CC para esses dispositivos sempre que o comprimento total do condutor for inferior a 5 metros, pois a tensão na entrada das *strings* não atinge os limites definidos por norma (AYRÃO, 2018) [20].

Figura 49. Modelo de String Box.



Fonte: BELENERGY (2025) [31].

3.6 Aterramento

Um item fundamental para o funcionamento dos SFV's é o sistema de aterramento. Sobre isso, não existe ainda uma normativa brasileira específica para o assunto, sendo que uma está sendo elaborada pela ABNT. Por enquanto, a norma norte-americana IEEE-2778-D4 – IEEE aborda o tema, focando em usinas fotovoltaicas de solo com mais de 5 MWp de potência instalada. Nela é enfatizado as diferenças entre os projetos de aterramento de usina fotovoltaica e de subestações, e é destacado que o seu objeto principal é a proteção de pessoas com relação a faltas para à terra na rede elétrica da usina fotovoltaica.

A norma também reconhece que o sistema de aterramento de uma usina fotovoltaica é formado pelas estruturas metálicas acima do solo interligadas por cabos de cobre nu ou de aço-cobreado enterrados (FREIRE, 2021) [29].

Além disso, o uso de um Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA) separado também é necessário em certas aplicações. As descargas atmosféricas representam um grande desafio para as usinas fotovoltaicas, pois nos locais de instalação das UFV's geralmente se tem uma alta densidade de raios, sendo que o sistema SPDA pode ser atingido anualmente por várias descargas diretas ou indiretas.

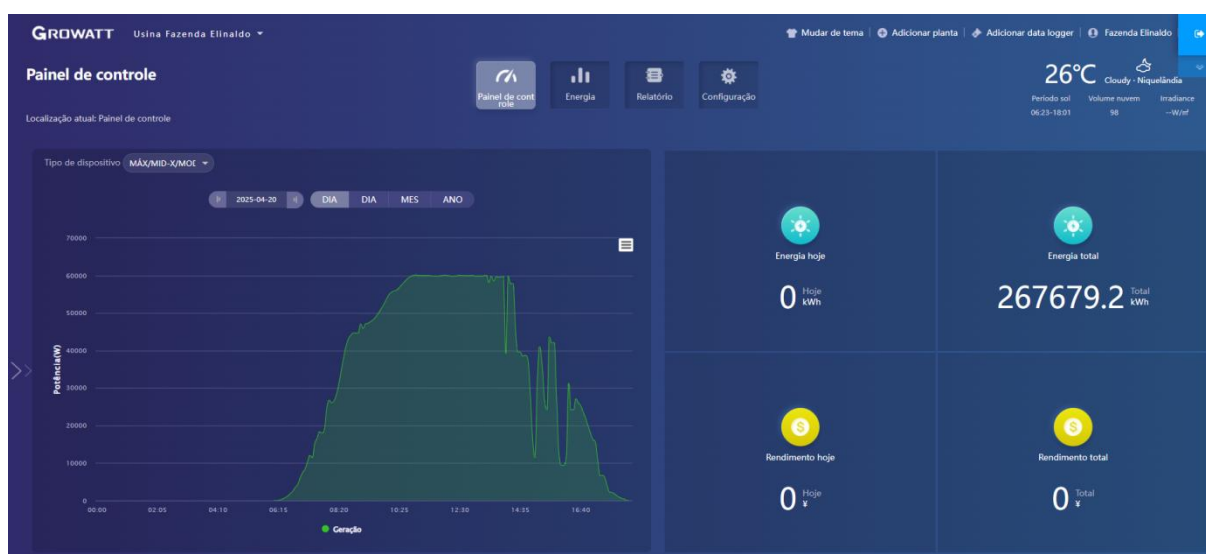
Para reduzir essa vulnerabilidade, torna-se necessário instalar sistemas SPDA e efetuar medidas de proteção de surtos dentro das recomendações da norma ABNT NBR 5419:2015, com características apropriadas às peculiaridades de uma usina solar fotovoltaica (SANTOS, 2020) [30].

3.7 Sistemas de Monitoramento

O monitoramento da geração permite acompanhar o desempenho dos equipamentos detectar falhas. Entre os dados disponibilizados estão: energia diária gerada, histórico de geração de todos os dias, estado do equipamento, histórico de falhas, valores instantâneos de Potência CC, Potência CA, Tensão CC, Tensão CA, Correntes CC, Correntes CA, entre outros. Pode ser realizado por meio de portais online, software local ou plataformas em nuvem. Sistemas modernos oferecem visualização gráfica em tempo real e históricos de geração, além de alarmes de operação anormal (PINHO; GALDINO, 2014) [11].

A Figura 50 apresenta um exemplo da interface de monitoramento, acessado pela internet, do inversor da Growatt de um SFVCR.

Figura 50. Interface de monitoramento da Growatt.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.8 Bancos de Baterias

As baterias armazenam energia para uso posterior, sendo fundamentais em SFVI's e cada vez mais presentes em sistemas híbridos. Segundo Mariano e Junior (2022) [12], as baterias armazenam a energia gerada, para permitir o consumo nos momentos de baixa ou nenhuma radiação solar, sendo normalmente do tipo chumbo-ácido e estacionária e possuindo tensões usuais de 12V, 24V ou 48V. Devem ser instaladas diretamente no piso, em caixas ou em armários; e em locais de instalação secos, limpos e frescos, pois as altas temperaturas resultam em redução da vida útil da bateria. Por fim, destacam que a vida útil de uma bateria é determinada pelo número de ciclos de carga e descarga que ela pode realizar, sendo que dois fatores influenciam no número máximo de ciclos da bateria, a temperatura de utilização e profundidade de descarga.

Um banco de bateria utilizado em um sistema UFVI está ilustrado na Figura 51.

Figura 51. Banco de baterias.



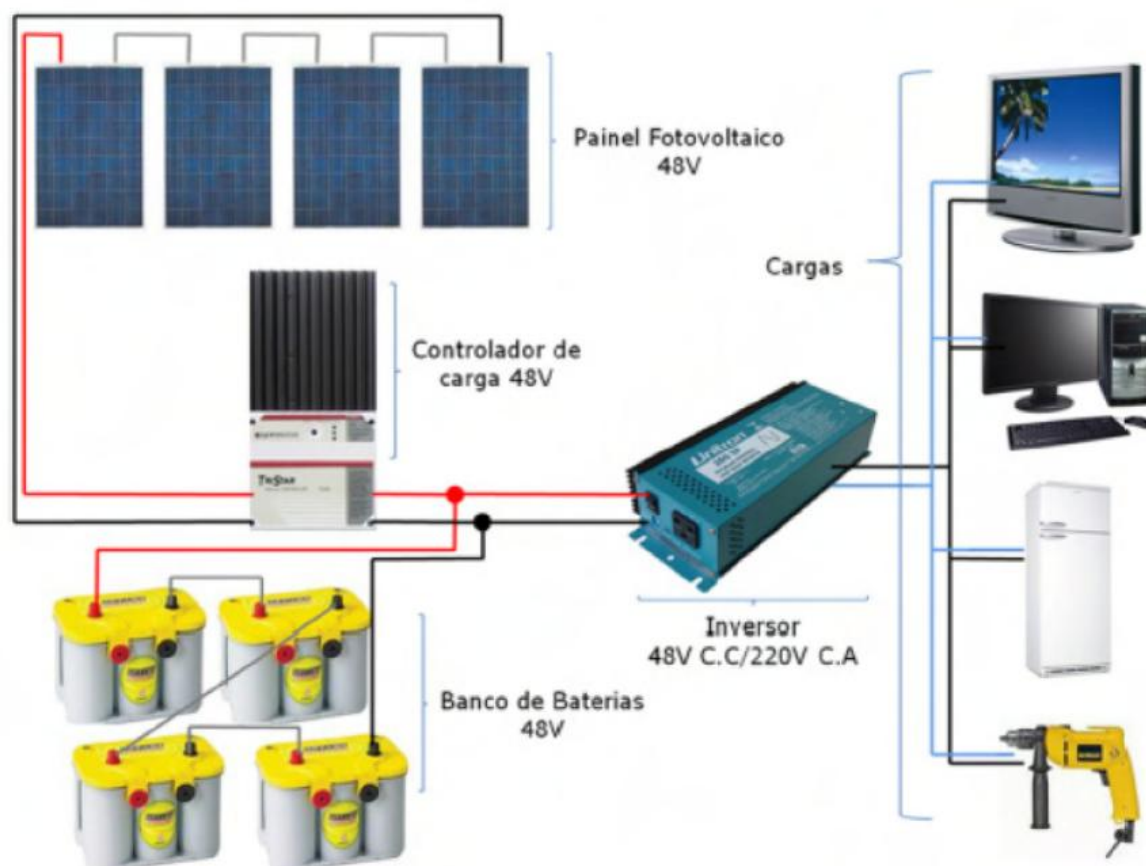
Fonte: CEPEL – CRESESB (2025) [32].

3.9 Controladores de Carga

Os controladores de carga são mais utilizados em SFVI's. Esses dispositivos regulam a energia enviada às baterias, protegendo contra sobrecargas e descargas profundas. Segundo Pinho e Galdino (2014) [11], o controlador deve ser dimensionado conforme a corrente do sistema e deve ter proteções integradas contra sobretensão, sobretemperatura e curto-circuito.

Com isso, busca-se proteger as baterias contra cargas excessivas, aumento assim a vida útil do sistema. A Figura 52 ilustra um SFVI destacando seus componentes, entre eles o controlador de carga.

Figura 52. SFVI com a utilização de controlador de carga.



Fonte: Mariano e Junior (2022) [12].

Segundo Mariano e Junior (2022) [12], existem diferentes tipos de controladores de carga, destacando-se os seguintes:

On/Off: consistindo na atuação de uma chave, quando a tensão no banco de baterias chega a valores pré-determinados, a chave abre ou fecha;

PWM: é a estratégia de controle de tensão constante, bastante usada hoje em dia, baseia-se, principalmente, no controle de modulação por largura de pulso (PWM), onde as baterias são alimentadas por uma corrente pulsada;

MPPT: são controladores de carga com rastreador de ponto máximo de potência, sendo atualmente os controladores de melhor eficiência. A função de MPPT pode produzir ganhos em potência de até 35% comparados com controladores convencionais.

4 DIMENSIONAMENTO E PROJETO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Neste item serão abordados os principais detalhes sobre o dimensionamento e projeto de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFVCR), ou *on-grid*, foco principal do estudo. Para que se obtenha o melhor desempenho dos sistemas, é necessário considerar aspectos como a inclinação e orientação dos módulos, a análise de sombreamento, a compatibilidade entre geradores e inversores e o dimensionamento correto do sistema de proteção elétrica (PINHO; GALDINO, 2014) [11].

4.1 Dimensionamento de um SFVCR

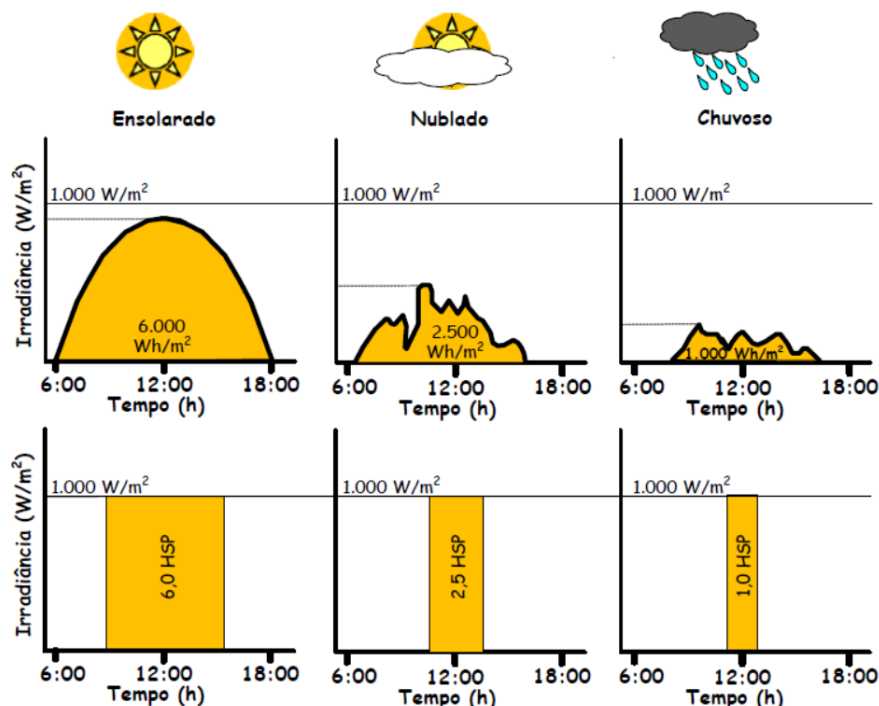
O dimensionamento desses sistemas depende de diversos fatores que não são totalmente previsíveis e estagnados, gerando assim uma certa incerteza a ser considerada no processo de dimensionamento. A principal fonte de incertezas é a atribuição correta de valores para a irradiação solar direta, pois ela não se dá da mesma maneira em todo o território nacional. Sobre o assunto, o Caderno de Tecnologias de Geração 2023 da EPE (2023) [2] traz a seguinte informação:

É comum prever a instalação de uma potência CC maior que a potência CA. Tal estratégia é utilizada pois as condições de irradiação e temperatura definidas para testes em laboratório dificilmente são encontradas em campo e, portanto, os módulos fotovoltaicos não atingem sua potência nominal na maior parte do tempo. Assim, o sobredimensionamento do arranjo CC possibilita a operação mais eficiente do inversor próximo às suas condições nominais.

Para o dimensionamento de SFV's, deve-se avaliar os itens dispostos a seguir.

Avaliação do recurso solar: nesta fase busca-se quantificar a irradiação solar sobre o módulo fotovoltaico. Para isso, uma medida bastante utilizada é o número de Horas de Sol Pleno (HSP), que reflete o número de horas durante um dia em que a irradiância solar permaneceu igual a 1.000 W/m^2 . Esse dado quantifica a energia disponibilizada pelo Sol no local em questão. Por exemplo, em um dia que teve irradiância de 6.000 Wh/m^2 , seu HSP é de 6 horas (PINHO; GALDINO, 2014) [11]. A Figura 53 ilustra essa relação.

Figura 53. Irradiância e HSP.



Fonte: Pinho e Galdino (2014) [11].

Localização: na etapa do dimensionamento, a localização que o sistema será instalado interfere na produção devido à fatores físicos como inclinação da superfície, orientação azimutal do módulo, presença de sombras que diminuirão a produção, ou então na presença de albedo que possa ser utilizado por módulos bifaciais (PINHO; GALDINO, 2014) [11].

Levantamento da demanda e do consumo de energia elétrica: a maneira mais tradicional de determinação da demanda de uma unidade consumidora é a soma das energias consumidas por cada equipamento. Para calcular o consumo médio de energia de um equipamento, deve-se obter a potência do aparelho no manual do usuário e multiplicar pelo número de horas que ele opera no dia e pelo número de dias por mês que ele é utilizado (PINHO; GALDINO, 2014) [11]. A maneira mais utilizada atualmente se baseia na leitura dos dados históricos de consumo da unidade consumidora, dispostos na conta de energia disponibilizada pela concessionária local.

A partir dessas informações iniciais, dá-se prosseguimento ao dimensionamento, efetuando o seguinte passo-a-passo.

Dimensionamento do arranjo fotovoltaico: a potência necessária para o arranjo fotovoltaico pode ser determinada por meio da equação [11]:

$$P_{FV} = \left(\frac{E}{\overline{TD} \cdot HSP_{MA}} \right) \quad \text{Eq. 4}$$

Onde

P_{FV} (Wp) é a potência de pico do arranjo fotovoltaico;

E (Wh/dia) é o consumo diário média anual da unidade;

HSP_{MA} (h) é a média anual das HSP incidente no plano do arranjo;

TD (adimensional) é a taxa de desempenho relacionada às perdas por queda de tensão, acúmulo de sujeira, degradação temporal, sombreamento, tolerância de fabricação, perdas devido à temperatura, eficiência do inversor, entre outras. Atribui-se um valor padrão de 0,70 a 0,75.

Dimensionamento do Inversor: escolhe-se o inversor primeiramente de acordo com a sua tecnologia (microinversores ou inversores *multistrings*) que pode variar de acordo com o local de instalação dentre outras características; e de acordo com a necessidade de alta eficiência em toda a sua faixa de operação, minimizando as perdas do sistema; e ainda de acordo com a existência de assistência técnica para o equipamento em território nacional (PINHO; GALDINO, 2014) [11].

Além disso, atualmente os inversores on-grid operam com potências de entrada que permitem um overload, ou seja, potência CC em relação à potência CA, de 40% a 50% acima da potência CA, existindo equipamentos que podem chegar a 100% de overload. Porém, segundo Pinho e Galdino (2014) [11], existem limites elétricos de entrada, devendo-se considerar a faixa de tensão de operação dos MPPT's e a corrente máxima CC de entrada para uma ótima utilização do overload do equipamento.

Outro fator deve ser levado em conta para o dimensionamento de um SFVCR é a regulamentação da região, pois, no Sistema de Compensação de Energia adotado pelo Brasil, quando o SFV gerar mais energia do que a demanda, a energia excedente é entregue à rede elétrica e o medidor registra essa energia, gerando créditos na conta do usuário que podem ser utilizados para o abatimento no consumo de meses que a produção não for suficiente (PINHO; GALDINO, 2014) [11]. Sendo assim, deve-se considerar essa questão para evitar super dimensionamentos que elevem os custos e o retorno financeiro do usuário.

No Caderno de Tecnologias de Geração 2023 da EPE (2023) [2], o órgão ainda comenta que a utilização de dados horários para estimativa da produção fotovoltaica pode levar à uma sobrestimativa de geração ou à uma subestimativa de perdas, e que esse valor é agravado à medida que a relação de superioridade de potência CC em relação à potência CA diminui.

Existem no mercado ferramentas computacionais que auxiliam no dimensionamento e projeto desses sistemas. A vantagem na utilização dessas ferramentas está na facilidade de obtenção de dados como análise de viabilidade, dimensionamento mais preciso dos equipamentos e cabeamentos e simulação de operação (PINHO; GALDINO, 2014) [11]. A ferramenta utilizada na UFV abordada no trabalho é o SOLergo.

SOLergo: foi o primeiro software fotovoltaico em português dedicado a realidade normativa e fiscal brasileira. A interface da ferramenta utilizada está apresentada na Figura 54.

Figura 54. Interface inicial do SOLergo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.2 Projeto Elétrico de um SFVCR

O projeto elétrico de um SFVCR envolve toda a instalação elétrica da unidade que irá receber a instalação, devendo-se tomar como referência todas as normativas atualizadas que regem o assunto. Segundo Pinho e Galdino (2014) [11], os SFVCR's diferenciam-se dos SFVI's por operarem obrigatoriamente em CA, na mesma frequência e tensão da rede; por ficarem inoperantes mesmo com irradiação solar quando não há tensão na rede; por possuírem a tecnologia dos MPPT's, que melhoram a produção; e por exigir que a rede suporte a geração.

Segundo Ayrão (2018) [20], a análise inicial para o projeto deve levantar os seguintes itens:

- Tipo de atendimento de energia pela concessionária, obtendo dados de tensão e tipo de entrada;

- Levantamento da área disponível para os módulos;

- Condições de instalação dos módulos, verificando se a instalação será realizada no telhado, na laje ou no solo, e devendo avaliar as condições de resistência das estruturas dos dois primeiros; possíveis pontos de sombreamento;

- Disponibilidade de projetos executivos de outras disciplinas;

- Características das condições das instalações elétricas existentes na unidade;

- Restrições de locais para a instalação do inversor;

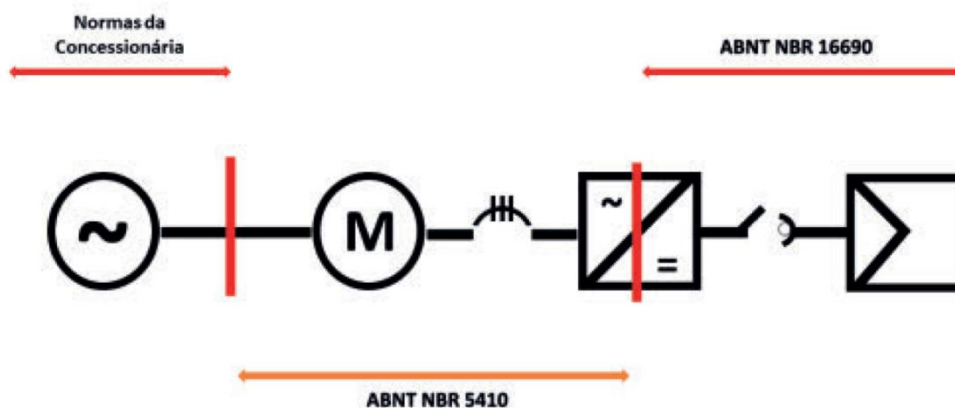
- Classificação das áreas quanto às influências externas;

- Determinação dos tipos de linhas elétricas a serem utilizados em função das restrições de influências externas.

Posteriormente, define-se o esquema básico de instalações, gerando o esquema unifilar do sistema fotovoltaico como um todo. Para isso, determina-se a definição do arranjo fotovoltaico, escolhendo ligações em série ou paralelo; a localização dos DPS CC e CA; a localização dos dispositivos de seccionamento; o esquema unifilar da stringbox (caso seja necessária); o esquema unifilar do quadro de proteções CA; e o esquema de aterramento utilizado (AYRÃO, 2018) [20].

Em relação às normativas que regem todas as etapas do projeto, Ayrão (2018) [20] define uma divisão em setores. A Figura 55 ilustra esta divisão e as normas aplicáveis para cada região.

Figura 55. Normas aplicáveis ao SFVCR.



Fonte: Ayrão (2018) [20].

Pode-se concluir que na parte da rede elétrica, deve-se seguir as definições do material normativo disponibilizado pela concessionária de energia. Além disso, é possível observar que a ABNT NBR 5410 não abrange integralmente um sistema fotovoltaico, pois sistemas em corrente contínua e arranjos fotovoltaicos trazem riscos além daqueles originados de sistemas de potência convencionais em corrente alternada, incluindo a capacidade de produzir e sustentar arcos elétricos com correntes que não são maiores do que as correntes de operação normais. A ABNT NBR 16690 complementa e altera a ABNT NBR 5410 nos pontos necessários em relação às especificidades dos SFV's, sendo, portanto, correta a associação dos requisitos de ambas as normativas (AYRÃO, 2018) [20].

Em relação à documentação completa necessária para a implementação de um SFVCR, Pinho e Galdino (2014) [11] definem o projeto básico e o projeto executivo, apresentados a seguir.

Projeto Básico: é o conjunto de documentações necessárias para a caracterização da obra a ser executada, atendendo às normas cabíveis e com base nos estudos preliminares que asseguram a viabilidade e o adequado tratamento ambiental do empreendimento. Essa documentação é composta por desenhos técnicos, memoriais descritivos e de cálculo, especificações técnicas dos equipamentos (*datasheets* e certificações), orçamento e cronograma físico-financeiro;

Projeto Executivo: trata-se do projeto que apresenta o conjunto de elementos necessários para a execução do sistema, sendo bem mais detalhado que o projeto básico e apresentando todos os materiais escolhidos para a composição do sistema, suas definições e quantitativos.

5 DIMENSIONAMENTO DA UFV MORRO REDONDO

Neste capítulo será realizado o dimensionamento do projeto de uma usina fotovoltaica na zona rural da cidade de Niquelândia - Goiás, analisando desde a etapa comercial, o desenvolvimento do projeto, o dimensionamento dos equipamentos e orçamento de instalação. Também serão incluídos os detalhes de enquadramento normativo e tarifário, até a fase final de entrega da usina em funcionamento.

Inicialmente, foi realizada uma Avaliação de Viabilidade Técnica (AVT) junto à concessionária para verificar a necessidade de adequação da rede elétrica da unidade. Com isso, foi elaborado um projeto de uma subestação aérea de 75kVA. Além disso, a concessionária de energia executou a extensão da rede MT trifásica até a nova subestação.

O sistema fotovoltaico foi dimensionado e executado em duas etapas, sendo que na primeira etapa foram instalados 120 módulos Phono Solar de 450W constituídos por 144 células fotovoltaicas monocristalinas conectados a um inversor on-grid trifásico Growatt de 60kW de potência; e na segunda, foram adicionados 80 módulos Jinko Solar de 460W constituídos por 120 células fotovoltaicas monocristalinas.

O empreendimento foi finalizado e atualmente encontra-se em operação. Possui um total de 90,8 kWp de potência de módulos conectada ao inversor de 60 kWp de potência e utilizando uma subestação aérea de 75 kVA para a injeção da energia gerada em MT.

A Usina Fotovoltaica hoje gera uma média de 10.622,48 kWh por mês de energia que é utilizada para o abatimento de todas as contas de dos imóveis de propriedade do cliente através do sistema de compensação na modalidade Autoconsumo Remoto.

5.1 Levantamento de Dados e Avaliação Técnica Preliminar

Em 19 de abril de 2021, o cliente solicitou a elaboração de um orçamento para o sistema de geração de energia elétrica destinado ao abatimento integral das contas de energia elétrica relativas aos seus 11 (onze) imóveis. Para viabilizar o dimensionamento adequado da usina fotovoltaica, o cliente disponibilizou um conjunto composto por oito faturas de energia elétrica, relativas aos oito anos anteriores, o que permitiu uma análise detalhada da demanda da energia consumida.

O consumo de energia médio mensal individualizado, bem como a média anual de consumo consolidado de cada uma das onze unidades consumidoras, estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Consumo mensal das unidades consumidoras.

ID	Nº UC	Endereço	M	Consumo (kW)	Média (kW)
UC1 Inclusa desde o dimensionamento	10481710	SETOR SUL, GOIANIA-GO	1	2.408,00	2.647,08
			2	2.512,00	
			3	2.223,00	
			4	2.069,00	
			5	2.438,00	
			6	2.313,00	
			7	2.768,00	
			8	2.735,00	
			9	2.757,00	
			10	3.108,00	
			11	3.102,00	
			12	3.332,00	
UC2 Inclusa desde o dimensionamento	10015382352	SETOR SUL, GOIANIA-GO	1	1.291,00	1.114,08
			2	1.335,00	
			3	1.297,00	
			4	1.380,00	
			5	1.634,00	
			6	1.480,00	
			7	283,00	
			8	277,00	
			9	574,00	
			10	1.127,00	
			11	1.351,00	
			12	1.340,00	
UC3 Inclusa desde o dimensionamento	10015872082	SETOR SUL, GOIANIA-GO	1	546,00	925,50
			2	736,00	
			3	577,00	
			4	430,00	
			5	205,00	
			6	1.532,00	
			7	1.478,00	
			8	1.399,00	
			9	1.529,00	
			10	1.073,00	
			11	805,00	
			12	796,00	

UC4 Inclusa desde o dimensionamento	10485442	SETOR SUL, GOIANIA-GO	1	0,00	2,58
			2	0,00	
			3	0,00	
			4	0,00	
			5	0,00	
			6	3,00	
			7	28,00	
			8	0,00	
			9	0,00	
			10	0,00	
			11	0,00	
			12	0,00	
UC5 - Origem Inclusa desde o dimensionamento Posteriormente desativada	10012982413	FAZENDA MORRO REDONDO, ZONA RURAL, NIQUELANDIA-GO	1	0,00	205,50
			2	0,00	
			3	714,00	
			4	490,00	
			5	281,00	
			6	152,00	
			7	245,00	
			8	268,85	
			9	315,15	
			10	0,00	
			11	0,00	
			12	0,00	
UC6 Inclusa desde o dimensionamento	10009039633	JARDIM BELVEDERE, CALDAS NOVAS-GO	1	106,00	32,66
			2	36,00	
			3	19,00	
			4	47,91	
			5	0,00	
			6	16,00	
			7	16,00	
			8	73,00	
			9	20,00	
			10	20,00	
			11	19,00	
			12	19,00	
UC7 Inclusa desde o dimensionamento	10015382263	SETOR SUL, GOIANIA-GO	1	63,00	55,75
			2	59,00	
			3	50,00	
			4	59,00	
			5	50,00	
			6	57,00	
			7	49,00	
			8	52,00	
			9	55,00	
			10	50,00	
			11	73,00	
			12	52,00	
TOTAL - UTILIZADO PARA O DIMENSIONAMENTO ORIGINAL					4.983,16
UC8 Incluída em Junho/2023	2750115791	FAZENDA GUEROBAL, ZONA RURAL, NIQUELANDIA-GO	1	0,00	0,00
			2	0,00	
			3	0,00	
			4	0,00	
			5	0,00	
			6	0,00	
			7	0,00	
			8	0,00	
			9	0,00	
			10	0,00	
			11	0,00	
			12	0,00	
UC9 Incluída em Abril/2023	10001740189	FAZENDA ANTÔNIO LAGES, ZONA RURAL, CALDAS NOVAS	1	0,00	12,42
			2	0,00	
			3	0,00	
			4	0,00	
			5	45,00	
			6	0,00	
			7	5,00	
			8	28,00	
			9	8,00	
			10	1,00	
			11	62,00	
			12	0,00	

UC10 Incluída em Junho/2024	13726080	SETOR GRANDE RETIRO, GOIÂNIA	1	0,00	104,25
			2	0,00	
			3	0,00	
			4	0,00	
			5	45,00	
			6	203,00	
			7	228,00	
			8	124,00	
			9	203,00	
			10	257,00	
			11	191,00	
			12	0,00	
UC11 Incluída em Junho/2024	10009589730	SETOR PAUZANES, RIO VERDE	1	5.618,00	4.511,75
			2	5.810,00	
			3	5.916,00	
			4	5.752,00	
			5	4.513,00	
			6	3.291,00	
			7	2.840,00	
			8	2.780,00	
			9	2.120,00	
			10	5.222,00	
			11	5.119,00	
			12	5.160,00	
TOTAL - APÓS ALTERAÇÕES DE RATEIO					9.611,58

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Baseado nas informações foi determinado um consumo médio mensal total de 4.983,16 kWh.

Adicionalmente, o cliente disponibilizou para a execução da usina fotovoltaica, a propriedade rural denominada Fazenda Morro Redondo, localizada na zona rural do município de Niquelândia, estado de Goiás, cuja área disponível era suficiente para a implantação de um sistema fotovoltaico do tipo fixado ao solo. Esta propriedade corresponde à Unidade Consumidora (UC) identificada pelo número 5 na tabela apresentada, sendo os dados cadastrais desta unidade os utilizados como referência para elaboração do orçamento.

Inicialmente, foi proposta uma solução técnica que permitiria o abatimento integral da demanda energética da época, porém sem margem adicional para futuras expansões. Entretanto, durante o período de elaboração do orçamento, observou-se que o mercado oferecia uma promoção específica em relação a um inversor fotovoltaico bastante empregado naquele momento, cuja potência nominal excedia a demanda calculada inicialmente em 46,36%, resultando em um total de 7.293,68 kWh por mês.

Este cenário, combinado com uma perspectiva de expansão futura da demanda energética nas propriedades, motivou a decisão do cliente pela aquisição deste equipamento em condições vantajosas e pela inclusão adicional de módulos fotovoltaicos, explorando o limite máximo permitido de sobredimensionamento (oversize) do inversor selecionado.

Será exposto nos itens a seguir essas duas etapas de cálculo.

5.2 Dimensionamento com Software Solergo

Com base nos dados coletados, utilizou-se o software Solergo para dimensionamento da usina fotovoltaica. Foram definidos parâmetros como localização geográfica, demanda energética mensal, exposição geométrica do gerador e dados elétricos da unidade. Com estes dados, o software calculou a geração média esperada mensal e anual.

- **Etapa 1 – 54 kWp**

Os dados inseridos na primeira etapa de dimensionamento do projeto para o atendimento à demanda de energia total, estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Dados Inseridos no Software Solergo - Etapa 1.

Nome do sistema	USINA FOTOVOLTAICA FAZENDA MORROREDONDO
Endereço	Fazenda Morro Redondo, Zona Rural, Niquelândia, Goiás, Brasil. CEP: 76420-000
Coordenadas de localização	Latitude: 14°14'09"S, Longitude: 48°05'01"W, Altitude: 530m (Dados obtidos no Google Earth)
Consumo anual de energia	87.524,2 kWh
Exposição dos geradores	Orientação de 180° em relação aosul com 10° de inclinação.
Dados da entrega de energia	Baixa tensão, conexão monofásica, tensão nominal de 220V e frequência de 60Hz
Módulo fotovoltaico selecionado	Phono Solar – Módulo Twinplus Mono-perc de alta eficiência – PS450M4-24/TH – 450W de potência nominal (módulo selecionado devido ao seu custo-benefício na época)
Inversor selecionado	Growatt – Inversor Série MAC – MAC60KTL3-X LV – 60kW de potência nominal (inversor selecionado devido ao seu custo-benefício na época)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

As telas do *Software Solergo* com a inserção dos dados levantados estão apresentadas nas figuras 56-67.

Ressalta-se a simplicidade em relação à área financeira, para estimar o valor a ser investido na construção da usina fotovoltaico e o tempo para o retorno do investimento. O software SOLERGO estima a quantidade mensal de energia que será captada e gerada. Por outro lado, o uso de planilhas eletrônicas permite detalhar e mensurar os valores investidos na usina, como infra-estrutura, equipamentos e mão-de-obra.

Figura 56. Tela inicial do Software Solergo com os dados cadastrais do sistema - Etapa 1.

Dados gerais do sistema
Dados gerais do sistema.

Localização da instalação

Denominação: USINA FOTOVOLTAICA FAZENDA MORRO REDONDO

Descrição:

Mapa

País: Brasil

Estado / Região: Goiás

Cidade: Niquelândia CEP: 76420-000

Endereço: Fazenda Morro Redondo Bairro: Zona Rural

Língua de documentação: Brasileiro

Principais Características

Sistema entra em operação como: Nova construção

Data de entrada em serviço: 29/09/2021

Guia Voltar Avançar

Figura 57. Tela do Software Solergo com a localização do sistema - Etapa 1.

Localização
Local de instalação do sistema fotovoltaico.

Localidade: Goiania/Santa Genov Selecionar

Latitude: 014°14'09"S Longitude: 048°05'01"W Altitude: 530 m

Fonte dados climáticos: ATLAS BRASILEIRO

Albedo

Reflexão média do terreno (albedo): 0% Selecionar

☐ Digite albedo mensal

Mês	Albedo	Descrição
Janeiro	0,0%	
Fevereiro	0,0%	
Março	0,0%	
Abril	0,0%	
Maio	0,0%	
Junho	0,0%	
Julho	0,0%	
Agosto	0,0%	
Setembro	0,0%	
Outubro	0,0%	
Novembro	0,0%	
Dezembro	0,0%	

Editar... Copiar para todos

Guia Voltar Avançar

Figura 58. Tela do Software Solergo com dados do cliente - Etapa 1.

Comitente
Dados pessoais do cliente.

Função:

Nome: Sobrenome:

C.P.F.: C.N.P.J.:

Sociedade:

Estado / Região:

Cidade:

Endereço: CEP:

Números de telefone: Fax:

E-mail:

Inscrição estadual:

Naturalidade: Data de nascimento:

Figura 59. Tela do Software Solergo com informações de consumo - Etapa 1.

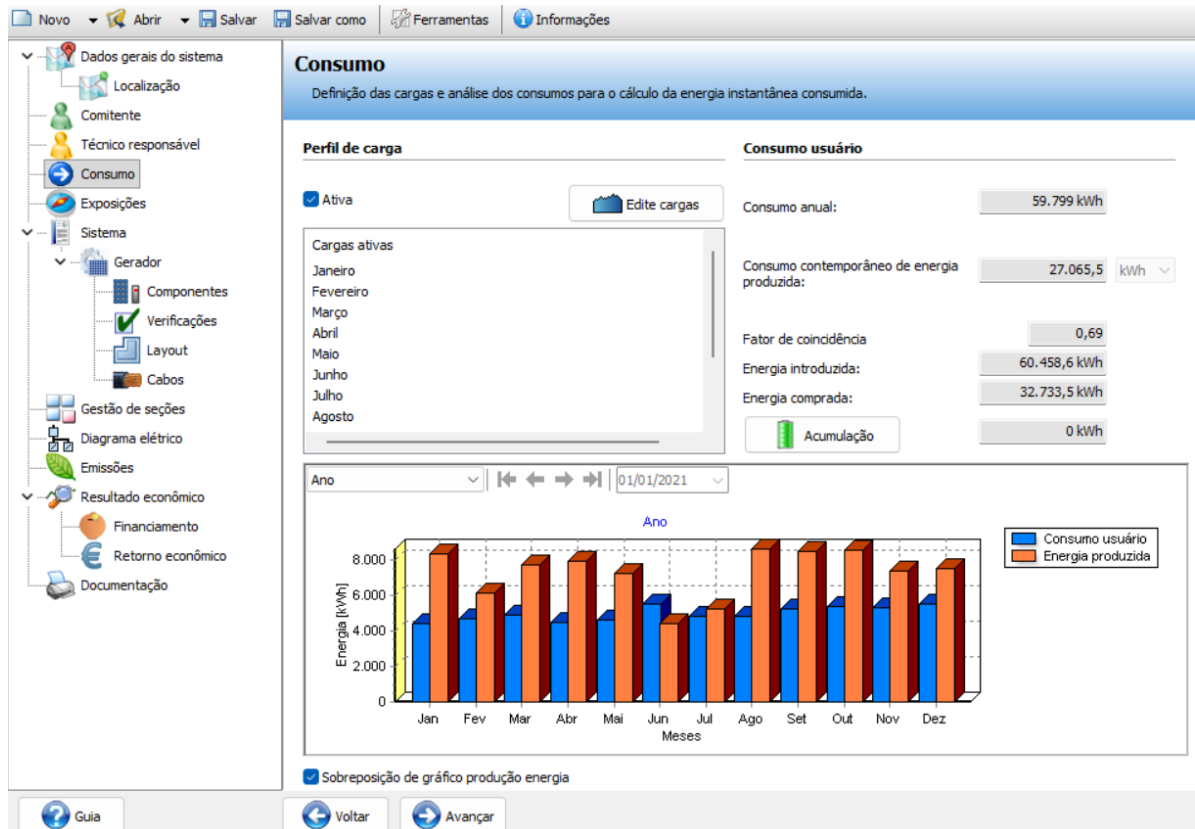


Figura 60. Tela inicial do Software Solergo com os dados cadastrais do sistema - Etapa 1.

Exposições
Orientação e instalação de módulos fotovoltaicos, sombreamento e valores de irradiação sobre o plano dos módulos.

Descrição	Orientação	Inclinação	Inclinação da s...	Sombreamento	Radiação solar líquida
Exposição 1	180°	10°	0°	0 %	1996,6 kWh/m²a

Orientação Sombreamento Radiação solar

Tipo de Instalação: Ângulo fixo

Orientação de módulos fotovoltaicos

Diagrama de orientação: Oeste +90°, Norte, Sul, Leste -90°. Inclinação (tilt): 10°. Inclinação da superfície: 0°.

Botões: Guia, Voltar, Avançar

Figura 61. Tela inicial do Software Solergo com os dados cadastrais do sistema - Etapa 1.

Sistema
Dados relativos de conexão à rede elétrica. Definição dos geradores que compõem o sistema.

Dados do contrato
Gestor da rede elétrica local: ENEL
Unidade consumidora: 10012982413
Número do cliente: 101799483

Entrega
Sistema: Baixa Tensão
Conexão à rede: Trifásico
Tensão nominal: 380 V 60 Hz
☐ Sistema com ponto de retirada BT
☒ Excluir o contador de produção

Proteção de interface
Integrado ao conversor cc/ca
Modelo:

Sistema de acúmulo
Configuração de instalação: Nenhum Tipologia

Resumo
Número de geradores: 1 Único inversor do sistema Copiar dados em todos os geradores

Descrição	Potência [kWp]	Energia anual [kWh]
Gerador	54	87524,2

Potência nominal: 54 kWp
Energia produzida: 87.524,2 kWh
Rendimento: 1.620,8 kWh/kWp
Performance Ratio: 81,2 %
Exporta os dados de produtividade

Definir o número de geradores do sistema. A produção anual de energia é calculada ao final do processo de inserção de dados.

Botões: Guia, Voltar, Avançar

Figura 62. Tela do Software Solergo com os componentes do sistema - Etapa 1.

Componentes
Tipo de módulos fotovoltaicos, inversor e proteções. Dados de dimensionamento.

Módulo fotovoltaico

Módulo fotovoltaico: PS450M4-24/TH Selecionar ...

Potência nominal: 450 Wp Área: 2,18 m² Novo... Propriedades

Inversor

Temperatura de operação (°C) Mínimo: -10 Máximo: 70

O número de módulos: 120 Área total: 261,2 m² Potência: 53,95 kWp Calcula...

Dimensionamento assistido

Inversor: GROWATT NEW ENERGY MAC 60KTL3-X LV Seleção manual

Número de inversores: 1 Nº máximo de ingressos utilizados: 1 Propriedades

Rastreadores simétricos: 1

Verificações elétricas

	Número de rastreadores	MPPT 1	MPPT 2	MPPT 3
Módulos em série	20	20	20	20
Conjunto de módulos paralelos	2	2	2	2
Exposição	Exposição 1 ...	Exposição 1 ...	Exposição 1 ...	Exposição 1 ...
Tensão de MPP (STC)	757,4 V	757,4 V	757,4 V	757,4 V
Número de módulos	40	40	40	40

Dimensionamento

Mesma configuração para todos os inversores ☐

Número total de módulos: 120 Potência total: 54 kWp Dispersões

Energia produzida anualmente: 87.524,2 kWh Rácio dimensionamento: 69,2 % Proteções

Figura 63. Tela do Software Solergo com os dados cadastrais do sistema - Etapa 1.

Verificações
Verificações elétricas.

Limites de tensão

- ✓ Tensão mínima Vn a 70,00 °C (635,8 V) maior do que Vmpp mínimo (200,0V)
- ✓ Tensão máxima Vn a -10,00 °C (852,0 V) inferior a Vmpp máx. (1000,0 V)
- ✓ Tensão a vazio Vo a -10,00 °C (995,4 V) inferior a tensão máx. do inversor (1100,0 V)
- ✓ Tensão a vazio Vo a -10,00 °C (995,4 V) inferior a tensão máxima de isolamento (1500,0 V)

Limites de corrente

- ✓ Corrente máxima de entrada relacionada a Isc (18,4 A) inferior a corrente máxima do inversor (50,0 A)

Limites de potência

- ✗ Dimensionamento de potência (69,2%) não compreendido entre 80,0% e 120,0%

Figura 64. Tela do Software Solergo com o Layout - Etapa 1.

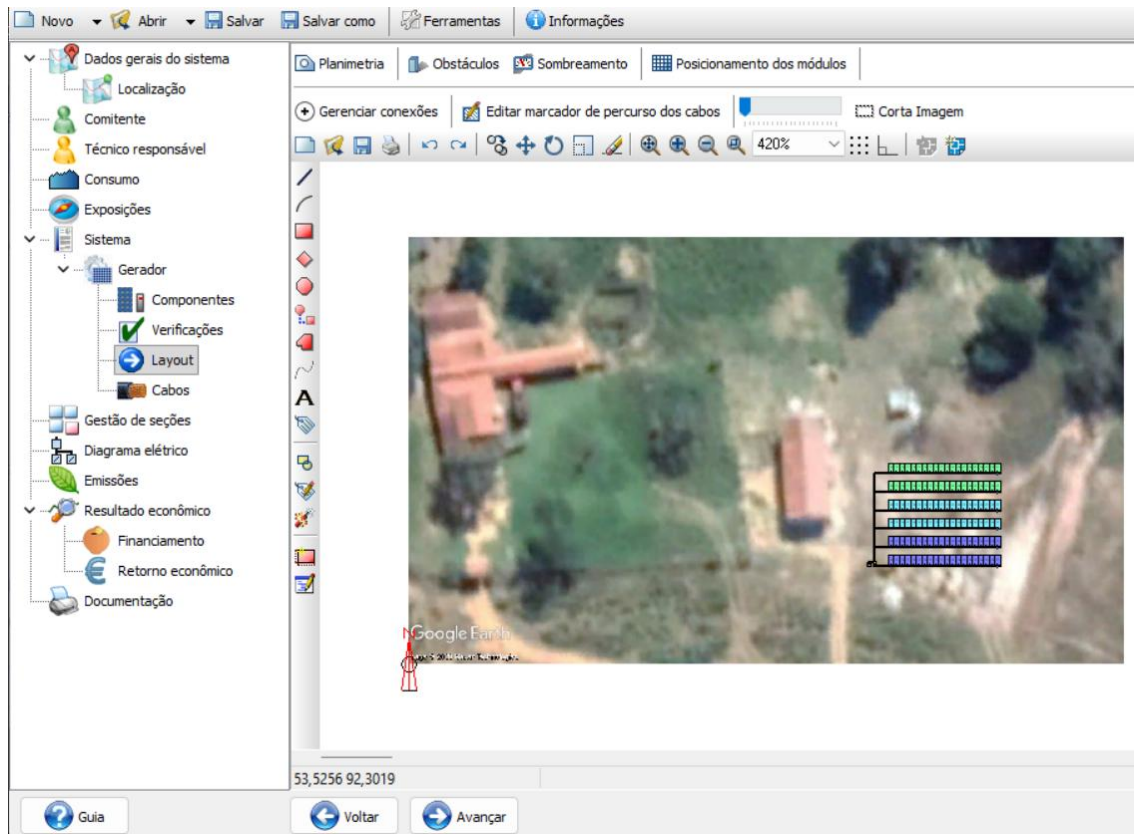


Figura 65. Tela do Software Solergo com a Gestão de Seções - Etapa 1.

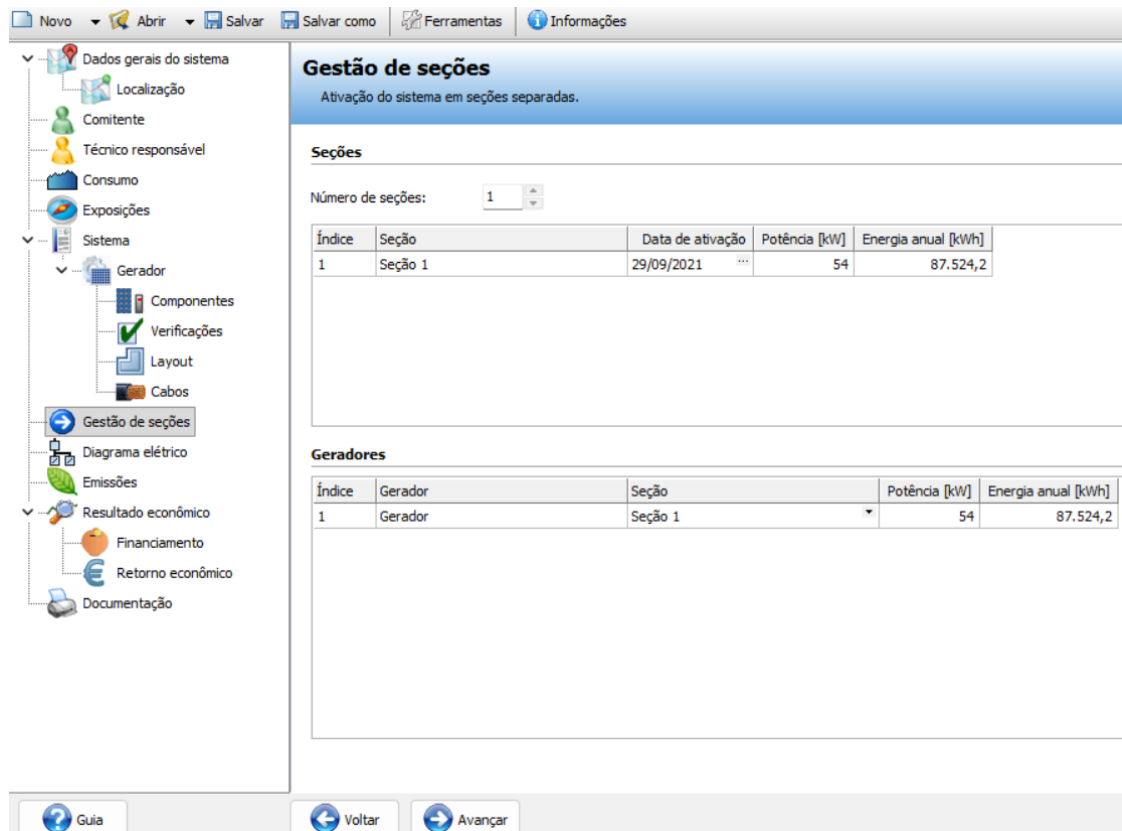


Figura 66. Tela do Software Solergo com o Diagrama Elétrico - Etapa 1.

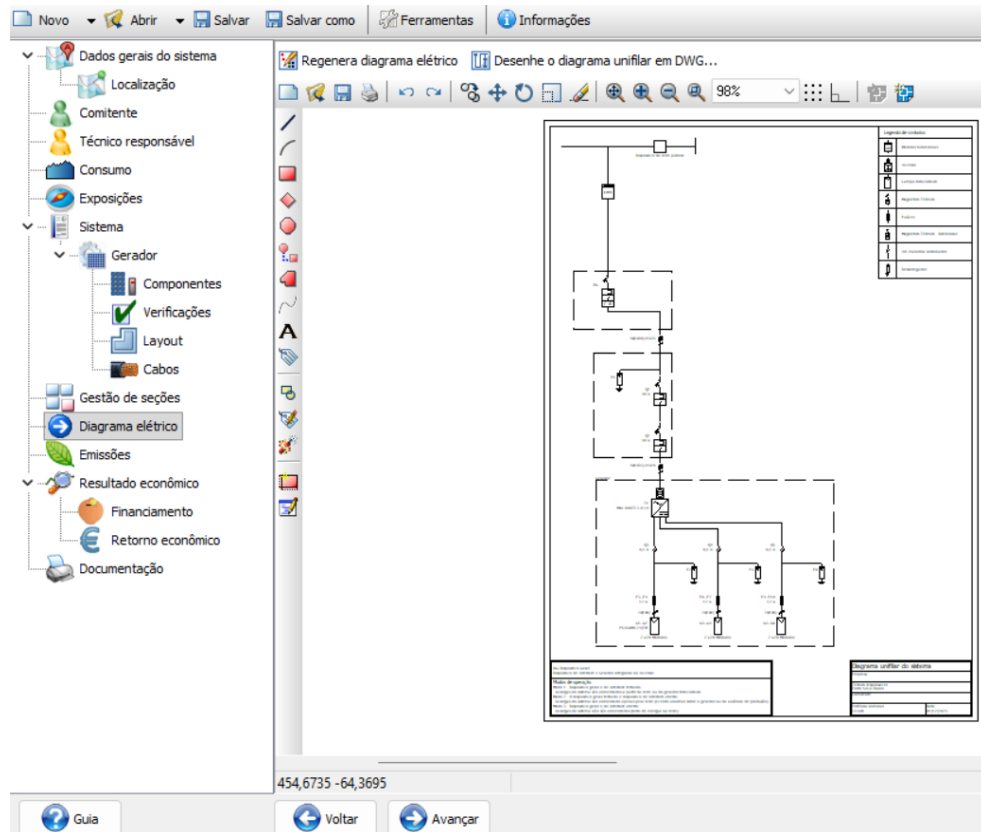
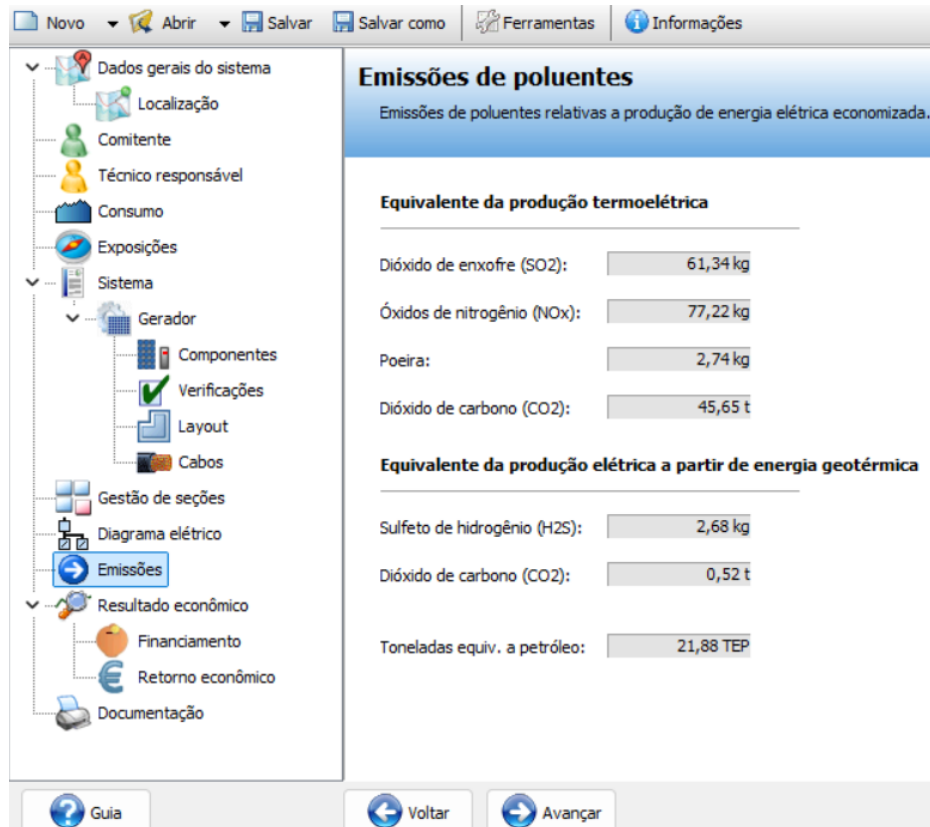


Figura 67. Tela do Software Solergo com a Emissão de Poluentes - Etapa 1.



Com os resultados obtidos, foi elaborado o relatório técnico final do sistema, apresentando a potência nominal de entrada, a produção prevista anualmente, a tensão nominal, a característica do sistema elétrico, além do código de identificação e número de seções, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Características do Projeto – Etapa 1.

Características Gerais	
Quantidade de módulos	120
Quantidade de inversores	1
Potência nominal de entrada	54 kWp
Área dos módulos	261,6 m ²
Produção anual prevista	87.524,2 kWh
Tensão nominal	380 V
Características da Conexão da Rede de Distribuição	
Sistema elétrico	Baixa Tensão
Conexão à rede	Trifásico
Gerente da rede de energia local	ENEL
Código de Identificação	10012982413

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

No relatório consta a descrição do sistema, o dimensionamento, a tabela de radiação solar, tabela de produção de energia, exposição, conjunto de conversão, as perdas por sombreamento, além de descrições relacionadas aos cabos elétricos, quadro elétrico, aterramento e monitoramento e controle.

A quantidade de energia produzível é calculada com base nos dados radiométricos, conforme a fonte ATLAS BRASILEIRO, o Atlas Solarimétrico do Brasil e utilizando os métodos de cálculo descritos nas normas.

As tabelas 7-9 apresentam os dados em relação à taxa de radiação solar na horizontal, produção de energia e a exposição do sistema fotovoltaico, com inclinação de 10°.

Tabela 7. Radiação Solar na Horizontal.

Mês	Total diário [MJ/m²]	Total mensal [MJ/m²]
Janeiro	23,31	722,61
Fevereiro	18,45	516,6
Março	20,4	632,4
Abril	20,77	623,1
Maio	17,72	549,32
Junho	11,47	344,1
Julho	13,07	405,17
Agosto	21,39	663,09
Setembro	22,76	682,8
Outubro	23,06	714,86
Novembro	21,04	631,2
Dezembro	20,85	646,35

Fonte: Elaborado pelo autor, com base no Software SOLergo (2025)

Tabela 8. Produção de Energia Fotovoltaica.

Mês	Total diário [kWh]	Total mensal [kWh]
Janeiro	269,82	8364,416
Fevereiro	219,961	6158,912
Março	248,558	7705,294
Abril	264,302	7929,069
Maio	232,96	7221,77
Junho	146,69	4400,693
Julho	168,98	5238,372
Agosto	278,459	8632,236
Setembro	282,371	8471,126
Outubro	275,212	8531,571
Novembro	245,827	7374,807
Dezembro	241,804	7495,926

Fonte: Elaborado pelo autor, com base no Software SOLergo (2025)

Tabela 9. Exposições.

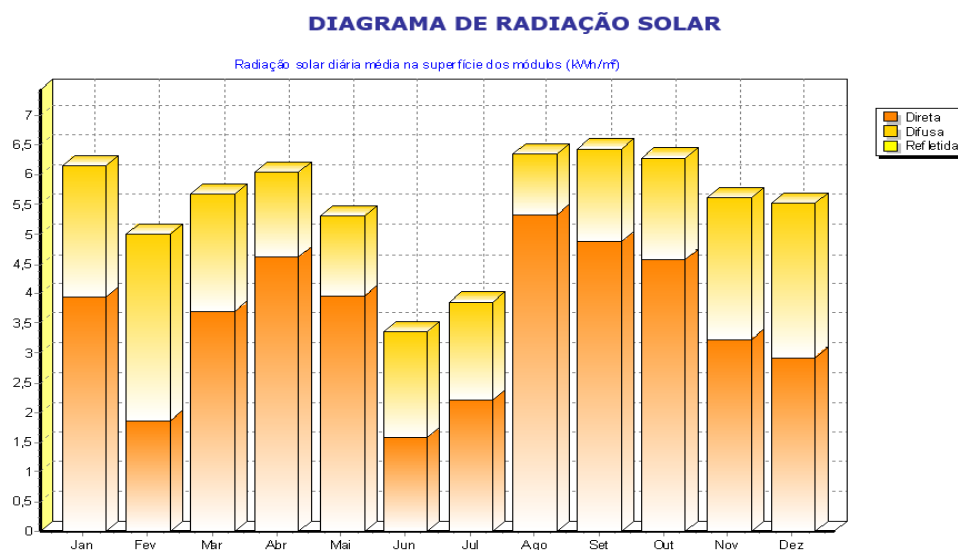
Descrição	Tipo de instalação	Orient	Inclin	Sombr
Exposição 1	Ângulo fixo	180°	10°	0 %

Fonte: Elaborado pelo autor, com base no Software SOLergo (2025)

Conforme os dados obtidos, a exposição 1 apresenta uma orientação de $180,00^\circ$ (azimute) em relação ao sul, e possui uma inclinação horizontal de $10,00^\circ$. A produção de energia da exposição 1 é condicionada por alguns fatores que determinam uma redução de radiação solar de sombreamento para a valor de 0 %.

O diagrama em forma de gráfico de barras da radiação solar, compreendendo as radiações Direta, Difusa e Refletida está ilustrado na Figura 68, e seus respectivos valores em kWh/m², estão apresentados na Tabela 10.

Figura 68. Diagrama de radiação solar anual para as diversas formas de radiação.



Fonte: Elaborado pelo autor, com base no Software SOLergo (2025).

Tabela 10. Radiação Solar Anual com as Diversas Formas de Radiação.

Mês	Radiação direta [kWh/m ²]	Radiação difusa [kWh/m ²]	Radiação refletida [kWh/m ²]	Total das diárias [kWh/m ²]	Total mensal [kWh/m ²]
Janeiro	3,93	2,225	0	6,155	190,806
Fevereiro	1,856	3,162	0	5,018	140,495
Março	3,688	1,982	0	5,67	175,77
Abril	4,612	1,417	0	6,029	180,875
Maio	3,95	1,365	0	5,314	164,741
Junho	1,576	1,77	0	3,346	100,387
Julho	2,209	1,646	0	3,855	119,496
Agosto	5,327	1,025	0	6,352	196,916
Setembro	4,881	1,56	0	6,441	193,24
Outubro	4,577	1,701	0	6,278	194,619
Novembro	3,218	2,39	0	5,608	168,232
Dezembro	2,933	2,583	0	5,516	170,994

Os módulos fotovoltaicos serão montados em suportes de aço galvanizado, com um ângulo de 10°, e todos terão a mesma exposição. Os sistemas de fixação da estrutura deverão resistir a rajadas de vento, com velocidade de até 120 km / h. As Tabelas 11 e 12 apresentam respectivamente as características do gerador da usina fotovoltaica e do inversor.

Um aspecto importante apresentado nas tabelas, apontam o quanto de energia será produzida ao longo dos meses. Isso interfere positivamente no projeto, pois enfatiza que o investimento terá retorno financeiro.

Tabela 11. Dados do Gerador Fotovoltaico.

CARACTERÍSTICAS DO GERADOR FOTOVOLTAICO	
Número de módulos:	120
Número de inversores:	1
Potência nominal:	54000 W
Eficiência:	69,2 %
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS MÓDULOS	
Fabricante:	PHONO SOLAR
Sigla:	TWINPLUS PS450M4-24/TH
Tecnologia de const.:	Silício monocristalino
Características elétricas	
Potência máxima:	450 W
Rendimento:	20,7 %
Tensão nominal:	37,9 V
Tensão em aberto:	45 V
Corrente nominal:	8,8 A
Corr. de curto-circuito:	9,2 A
Dimensões	
Dimensões:	1039 mm x 2095 mm
Peso:	24,8 kg

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em SOLergo (2025).

Tabela 12. Dados Técnicos do Inversor.

DADOS TÉCNICOS DO INVERSOR	
Fabricante:	GROWATT NEW ENERGY
Modelo	MAC 60KTL3-X LV MAC
Tracker	3
Entrada para rastreador	4
Características elétricas	
Potência nominal	60 kW
Potência máxima	78 kW
Potência máxima por rastreador	26 kW
Tensão nominal	600 V
Tensão máxima	1100 V
Tensão mínima por rastreador	200 V
Tensão máxima por rastreador	1000 V
Tensão máxima de saída	231 Vac
Corrente nominal	150 A
Corrente máxima	150 A
Corrente máxima por rastreador	50 A
Rendimento	0,99

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em SOLergo (2025)

A distribuição dos Módulos nos Rastreadores (*strings*) foi realizada conforme os dados de Tabela 13.

Tabela 13. Distribuição dos Módulos nos Rastreadores (strings).

Inversor 1	MPPT 1	MPPT 2	MPPT 3
Módulos em série	20	20	0
Conjunto de módulos em paralelos	3	3	0
Exposições	Exposição 1	Exposição 1	Exposição 1
Tensão MPPT (STC)	757,4 V	757,4 V	0 V
Número de módulos	60	60	0

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em SOLergo (2025)

Utilizando esta distribuição, foram obtidos no Software Solergo os valores da produção efetiva de energia, considerando sistema sem perdas por sombreamento, apresentados na Tabela 14.

Tabela 14. Produção Efetiva de Energia som Perdas por Sombreamento.

Mês	Sem obstáculos [kWh]	Produção efetiva [kWh]	Perdas [kWh]
Janeiro	8364,4	8364,4	0,0 %
Fevereiro	6158,9	6158,9	0,0 %
Março	7705,3	7705,3	0,0 %
Abril	7929,1	7929,1	0,0 %
Maio	7221,8	7221,8	0,0 %
Junho	4400,7	4400,7	0,0 %
Julho	5238,4	5238,4	0,0 %
Agosto	8632,2	8632,2	0,0 %
Setembro	8471,1	8471,1	0,0 %
Outubro	8531,6	8531,6	0,0 %
Novembro	7374,8	7374,8	0,0 %
Dezembro	7495,9	7495,9	0,0 %
Ano	87524,2	87524,2	0,0 %

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em SOLergo (2025).

No próximo item será feito um dimensionamento manual com os conhecimentos obtidos na teoria em comparação com os dados obtidos pelo software SOLERGO.

- **Etapa 2 – 90 kWp (Ampliação de 36 kWp)**

Durante a execução do projeto, foram apresentadas pelo cliente novas unidades consumidoras, cujo consumo de energia, também deveriam ser compensados pela usina fotovoltaica.

A ampliação solicitada corresponde a 36 kWp, elevando a potência total do sistema para 90 kWp.

Seguindo as orientações de projeto apresentadas na Etapa 1, o relatório obtido por meio do Software SOLergo referente à esta ampliação, está apresentado na Tabela 15.

Tabela 15. Tabela de dados inseridos no Solergo - Etapa 2

Nome do sistema	USINA FOTOVOLTAICA FAZENDA MORROREDONDO
Endereço	Fazenda Morro Redondo, Zona Rural, Niquelândia, Goiás, Brasil. CEP: 76420-000
Coordenadas de localização	Latitude: 14°14'09"S, Longitude: 48°05'01"W, Altitude: 530m (Dados obtidos no Google Earth)
Consumo anual de energia	145.853 kWh
Exposição dos geradores	Orientação de 180° em relação ao sul com 10° de inclinação.
Dados da entrega de energia	Baixa tensão, conexão monofásica, tensão nominal de 220V e frequência de 60Hz
Módulo fotovoltaico selecionado	Phono Solar – Módulo Twinplus Mono-perc de alta eficiência – PS450M4-24/TH – 450W de potência nominal (módulo selecionado devido ao seu custo-benefício na época) Jinko Solar – Módulo Tiger Pro 60HC de alta eficiência – JKM450M-60HL4-V – 450W de potência nominal (módulo selecionado devido ao seu custo-benefício na época)
Inversor selecionado	Growatt – Inversor Série MAC – MAC60KTL3-X LV – 60kW de potência nominal (inversor selecionado devido ao seu custo-benefício na época)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Com os resultados obtidos, foi elaborado o relatório técnico final do sistema, apresentando a potência nominal de entrada, a produção anual prevista, a tensão nominal, a característica do sistema elétrico, o código de identificação e o número de seções, conforme apresentado na Tabela 16.

Tabela 16. Características do Projeto – Etapa 2.

Características Gerais	
Quantidade de módulos	200
Quantidade de inversores	1
Potência nominal de entrada	90 kWp
Área dos módulos	434,4 m ²
Produção anual prevista	145.853 kWh
Tensão nominal	380 V
Características da Conexão da Rede de Distribuição	
Sistema elétrico	Baixa Tensão
Conexão à rede	Trifásico
Gerente da rede de energia local	ENEL
Código de Identificação	10012982413

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em SOLergo (2025).

No relatório consta a descrição do sistema, o dimensionamento, a tabela de radiação solar, tabela de produção de energia, exposição, conjunto de conversão, as perdas por sombreamento, além de descrições relacionadas aos cabos elétricos, quadro elétrico, aterramento e monitoramento e controle.

Os dados em relação à taxa de radiação solar na horizontal, a produção de energia e a exposição do sistema fotovoltaico, com inclinação de 10°, estão ilustrados nas tabelas 17 e 18.

Tabela 17. Radiação Solar na Horizontal.

Mês	Total diário [MJ/m²]	Total mensal [MJ/m²]
Janeiro	23,31	722,61
Fevereiro	18,45	516,6
Março	20,4	632,4
Abril	20,77	623,1
Maio	17,72	549,32
Junho	11,47	344,1
Julho	13,07	405,17
Agosto	21,39	663,09
Setembro	22,76	682,8
Outubro	23,06	714,86
Novembro	21,04	631,2
Dezembro	20,85	646,35

Tabela 18. Produção de Energia.

Mês	Total diário [kWh]	Total mensal [kWh]
Janeiro	449,636	13938,718
Fevereiro	366,55	10263,399
Março	414,204	12840,336
Abril	440,441	13213,242
Maio	388,212	12034,577
Junho	244,448	7333,449
Julho	281,593	8729,382
Agosto	464,033	14385,02
Setembro	470,551	14116,542
Outubro	458,622	14217,27
Novembro	409,653	12289,603
Dezembro	402,95	12491,439

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em SOLergo (2025).

As características do gerador da usina fotovoltaica e os dados do inversor estão apresentados nas tabelas 19 e 20.

Tabela 19. Dados do Gerador Fotovoltaico – apenas da ampliação..

CARACTERÍSTICAS DO GERADOR FOTOVOLTAICO	
Número de módulos:	80
Número de inversores:	1
Potência nominal:	36000 W
Eficiência:	46,2 %
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS MÓDULOS	
Fabricante:	JINKO SOLAR
Sigla:	Tiger Pro 60HC JKM450M-60HL4-V
Tecnologia de const.:	Silício monocristalino
Características elétricas	
Potência máxima:	450 W
Rendimento:	20,9 %
Tensão nominal:	31,7 V
Tensão em aberto:	38,9 V
Corrente nominal:	10,6 A
Corr. de curto-circuito:	11,2 A
Dimensões	
Dimensões:	1134 mm x 1903 mm
Peso:	24,2 kg

Tabela 20. Dados Técnicos do Inversor – dados referentes à ampliação.

DADOS TÉCNICOS DO INVERSOR	
Fabricante:	GROWATT NEW ENERGY
Modelo	MAC 60KTL3-X LV MAC
Tracker	3
Entrada para rastreador	4
Características elétricas	
Potência nominal	60 kW
Potência máxima	78 kW
Potência máxima por rastreador	26 kW
Tensão nominal	600 V
Tensão máxima	1100 V
Tensão mínima por rastreador	200 V
Tensão máxima por rastreador	1000 V
Tensão máxima de saída	231 Vac
Corrente nominal	150 A
Corrente máxima	150 A
Corrente máxima por rastreador	50 A
Rendimento	0,99

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em SOLergo (2025)

A distribuição dos Módulos nos Rastreadores (*strings*) foi realizada conforme os dados de Tabela 21.

Tabela 21. Distribuição dos Módulos nos Rastreadores (strings).

Inversor 1	MPPT 1	MPPT 2	MPPT 3
Módulos em série	20	20	20
Conjunto de módulos em paralelos	3	3	4
Exposições	Exposição 1	Exposição 1	Exposição 1
Tensão MPPT (STC)	757,4 V	757,4 V	634,6 V
Número de módulos	60	60	80

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em SOLergo (2025)

Utilizando esta distribuição, foram obtidos no Software Solergo os valores da produção efetiva de energia, considerando sistema sem perdas por sombreamento, apresentados na Tabela 22.

Tabela 22. Produção Efetiva de Energia som Perdas por Sombreamento.

Mês	Sem obstáculos [kWh]	Produção efetiva [kWh]	Perdas [kWh]
Janeiro	13938,7	13938,7	0,00%
Fevereiro	10263,4	10263,4	0,00%
Março	12840,3	12840,3	0,00%
Abril	13213,3	13213,3	0,00%
Maio	12034,6	12034,6	0,00%
Junho	7333,5	7333,5	0,00%
Julho	8729,4	8729,4	0,00%
Agosto	14385	14385	0,00%
Setembro	14116,5	14116,5	0,00%
Outubro	14217,3	14217,3	0,00%
Novembro	12289,6	12289,6	0,00%
Dezembro	12491,4	12491,4	0,00%
Ano	145853	145853	0,00%

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em SOLergo (2025)

No próximo item será realizado um dimensionamento manual com os conhecimentos obtidos na teoria, ao quais serão comparados com os resultados obtidos pelo software Solergo..

5.3 Dimensionamento Manual

Os cálculos realizados nesta primeira parte são referentes ao projeto inicial, denominado Etapa 1 – 54 kWp.

Os dados de irradiação foram obtidos pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB), e estão apresentados na Figura 69.

Figura 69. Irradiação solar diária média mensal – CRESESB.

Estação: Colinas do Sul
Município: Colinas do Sul, GO - BRASIL

Latitude: 14,201° S

Longitude: 48,049° O

Distância do ponto de ref. (14,235833° S; 48,083611° O): 5,4 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]											
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
☒	Plano Horizontal	0° N	5,42	5,55	5,28	5,21	5,04	4,90	5,18	5,99	5,79	5,66	5,19	5,42
☒	Ângulo igual a latitude	14° N	5,06	5,35	5,32	5,55	5,70	5,71	5,98	6,61	5,97	5,52	4,88	5,01
☒	Maior média anual	17° N	4,95	5,27	5,29	5,60	5,80	5,85	6,11	6,70	5,97	5,47	4,79	4,90
☒	Maior mínimo mensal	4° N	5,34	5,52	5,31	5,33	5,25	5,16	5,44	6,19	5,87	5,65	5,12	5,32

Fonte: CRESESB (2025)

A potência de pico do arranjo fotovoltaico é obtida por meio da Equação:

$$P_{FV} = \left(\frac{\frac{E}{TD}}{HSP_{MA}} \right) \quad \text{Eq. 5}$$

sendo, P_{FV} a Potência de Pico do arranjo fotovoltaico, E o consumo diário médio anual da unidade, e HSP_{MA} a Taxa de Desempenho e a média anual das HSP incidente no plano do arranjo.

Conforme os dados apresentados na Tabela 5, o sistema deve atender a um consumo anual de energia de 87.524,2 kWh. Assim, o consumo diário médio anual corresponde a:

$$E = \frac{87.524,2 \text{ kWh}}{365} = 239,792 \text{ kWh} \quad \text{Eq. 6}$$

Obtém-se

$$P_{FV} = \left(\frac{\frac{239792}{0,75}}{5,39} \right) \cong 59.317,75 \text{ Wp} \cong 59,32 \text{ kWp} \quad \text{Eq. 7}$$

A quantidade de módulos é determinada pela equação:

$$N_{md} = \frac{P_{FV(pico)}}{P_{T(módulo)}} \Rightarrow N_{md} = \frac{59317,75}{450} \Rightarrow N_{md} \cong 132 \text{ módulos} \quad \text{Eq. 8}$$

A estimativa de energia gerada anualmente:

$$E_{anual} = P_{FV(pico)} \cdot HSP_{MA} \cdot 365 \cdot TD \quad \text{Eq. 9}$$

A estimativa de geração de energia anualmente será:

$$E_{anual} = 59,32 \times 5,39 \times 365 \times 0,75 \Rightarrow E_{anual} \cong 87.527,4 \text{ kWh/ano} \quad \text{Eq. 10}$$

Para a etapa de ampliação da usina, denominada Etapa 2 – 90 kWp (Ampliação de 36 kWp), conforme os dados apresentados na Tabela 15, o sistema deverá atender a um consumo anual de energia de 145.853 kWh. Assim, o consumo diário médio anual corresponde a:

$$E = \frac{145.853 \text{ kWh}}{365} = 399,60 \text{ kWh} \quad \text{Eq. 11}$$

$$P_{FV} = \left(\frac{\frac{399597}{0,75}}{5,39} \right) \cong 98.849,04 \text{ Wp} \cong 98,85 \text{ kWp} \quad \text{Eq. 12}$$

A quantidade de módulos é determinada pela equação:

$$N_{md} = \frac{P_{FV(pico)}}{P_{T(módulo)}} \Rightarrow N_{md} = \frac{98849,04}{450} \Rightarrow N_{md} \cong 220 \text{ módulos} \quad \text{Eq. 13}$$

A estimativa de energia gerada anualmente:

$$E_{anual} = P_{FV(pico)} \cdot HSP_{MA} \cdot 365 \cdot TD \quad \text{Eq. 14}$$

Substituindo:

$$E_{anual} = 98,85 \times 5,39 \times 365 \times 0,75 = 145.854,4 \text{ kWh/ano} \quad \text{Eq. 15}$$

A corrente nominal do inversor é obtida por meio da equação,

$$I_{nominal} = \frac{P_{T(nominal)}}{\sqrt{3} \cdot V_{conexão} \cdot \eta_{inv}} \quad (\text{Equação 5}) \quad \text{Eq. 16}$$

onde η_{inv} corresponde ao fator de potência do inversor que é de 0,99:

$$I_{nominal} = \frac{60000}{(\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0.99)} \Rightarrow I_{nominal} \cong 92,08 \text{ A} \quad \text{Eq. 17}$$

Comparando os resultados calculados aos obtidos por meio do Software Solergo, observa-se uma divergência de 9,8 %, sendo que o software estima uma maior capacidade de geração de energia para as placas.

Na execução do projeto, foram utilizados 200 módulos fotovoltaicos de 450 W e um inversor de 60 kWp. Neste sistema foi utilizada a técnica *overload*, onde é empregada uma potência maior de placas em relação ao inversor para que o mesmo opere na sua potência máxima pelo maior tempo possível.

Para comparações posteriores, pode-se calcular a geração de energia desses 200 módulos (90 kWp) por meio da Eq. 14:

$$E_{anual} = 90 \times 5,39 \times 365 \times 0,75 = 132.796,1 \text{ kWh/ano} \quad \text{Eq. 18}$$

6 SOLICITAÇÕES TÉCNICAS JUNTO À CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA

Neste capítulo são apresentadas as solicitações técnicas enviadas à concessionária de energia da época, a Enel Distribuição. O processo se inicia com a solicitação de Análise de Viabilidade Técnica (AVT), passando pelas solicitações de aprovação dos projetos da usina e da subestação e finalizando com solicitações de vínculo administrativo.

6.1 Análise de Viabilidade Técnica (AVT)

A primeira Análise de Viabilidade Técnica (AVT) foi realizada no dia 30 de dezembro de 2020. Com o código do cliente 101799483 e processo OC 365575642, o documento foi registrado para atender à criação de gado da Fazenda Morro Redondo, com a carga de 75 kVA.

Contudo, o projeto precisou passar por mudanças, pois só seria liberado se:

- a. A tensão de fornecimento fosse de 34,5 kV
- b. A alimentação pelo circuito 31 fosse de 34,5 kV, e em Niquelândia de 69 kV
- c. Manter o fator de potência no patamar de 92% (indutivo ou capacitivo)

Essas condições foram emitidas pela ENEL, em conformidade com o art. 37 da Resolução 414/2010 da ANEEL, onde a resposta se refere à contratação de terceiro legalmente habilitado a fim de que o projeto esteja de acordo com o cadastro da ENEL, a execução da obra deve estar em conformidade com os padrões técnicos e normas vigentes.

A segunda AVT foi emitida no dia 04 de abril de 2022, onde foi liberada a execução da obra, após o cumprimento das demandas ou mudanças anteriores pedidas pela ENEL, na primeira AVT. A autorização está ilustrada na Figura 70.

Figura 70. Autorização para execução do projeto.

Prezado (a) Senhor (a),

Em atenção à sua solicitação para análise de viabilidade técnica de uma carga de 75 kVA, para atender uma geração distribuída fotovoltaica, situada na Fazenda Morro Redondo, coordenadas UTM 22L 814729 / 8424220, município de Niquelândia - GO, informamos que a mesma poderá ser liberada mediante as seguintes condições:

1. Tensão de fornecimento: 34,5 kV.
2. Alimentação pelo circuito 31, 34,5 kV, SE Niquelândia 69kV.
3. **Atendimento à Informação de Acesso CE-NASOGO-0370-22, em anexo.**
4. Assinatura do devido Contrato de Fornecimento, antes da ligação da carga.
5. Manter o fator de potência mínimo de 92% (indutivo ou capacitivo), conforme determina o Artigo 95 da Resolução 414/2010 da ANEEL.

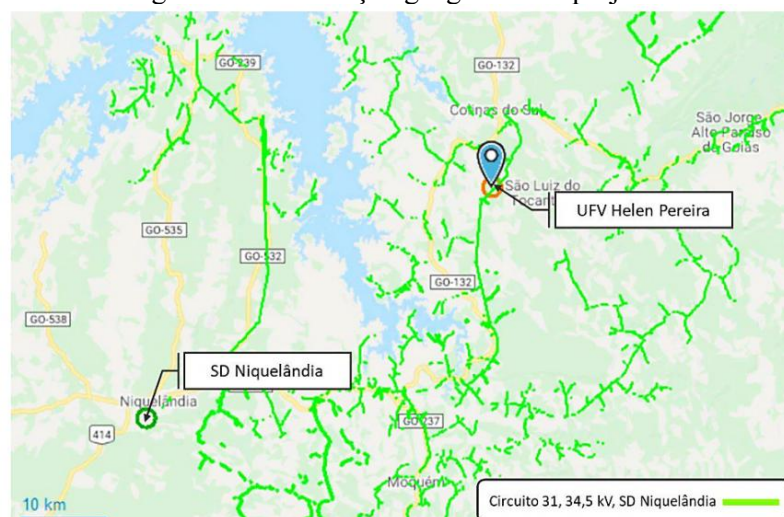
Atenciosamente,



Engº Erick Xavier de Alencar
I&N – Conexões

O documento também apresenta a localização geográfica onde o projeto será executado e a subestação da Enel responsável por alimentar a instalação, conforme ilustrado na Figura 71.

Figura 71. Localização geográfica do projeto.



O procedimento seguinte é a solicitação da Carta de Orçamento.

6.2 Carta de Orçamento

Com a AVT contendo a resposta positiva, foi solicitado a carta de orçamento. Nela constou que o projeto precisaria passar por mudanças para ser viável, sendo assim foi realizado um documento que contém as considerações sobre a carga e geração, as adequações da obra, melhorias e reforço, informações para conexão, e, por fim o custo estimado do investimento para a conexão. A figura abaixo mostra essas informações:

Figura 72. Informações da Carta de Orçamento.

Objeto

Adequar o sistema Enel de distribuição de energia elétrica por meio de execução da (s) obra (s) de infraestrutura expostas abaixo:

→ Construção de 0,4 Km RDR 3#4 CAA – 34,5 KV;

Cronograma

Em conformidade com a Resolução Normativa ANEEL nº 414/2010, o prazo máximo de conclusão é de até 120 (cento e vinte) dias, a partir do aceite desta proposta.

Condições Gerais

É opcional a autoconstrução desde que cumpra as condições e os procedimentos da Enel Distribuição Goiás, disponíveis nos canais de atendimento. O aceite da proposta, bem como a opção por autoconstrução devem ser comunicadas, por escrito, em até 30 (trinta) dias, a partir do recebimento deste.

Investimento

Orçamento total da obra	R\$ 28.631,16
Participação da Enel no custo da obra	R\$ 28.631,16
Participação financeira do cliente	R\$ 0,00

Como adequação, a concessionária solicitou a complementação de 0,4 km de rede de distribuição trifásica com 3#4 CAA – 34,5 kV. Duas opções foram oferecidas ao cliente: executar a extensão para posterior ressarcimento ou aguardar a execução da extensão pela concessionária. O cliente optou pela segunda opção, no qual a concessionária ficaria responsável pela obra de extensão.

Após selecionado a opção de construção sob responsabilidade da concessionária, foi expedido o documento de adesão ao sistema de energia elétrica com a emissão dos contratos do cliente com a concessionária. Neste documento, as cláusulas compreendem os pontos em que prevê a operação segura e ordenada das instalações elétricas que interligam o sistema de microgeração ao sistema de distribuição da ENEL.

Entretanto, pode-se destacar a cláusula quinta do documento onde estão descritos os equipamentos, conforme ilustrado na Figura 73.

Figura 73. Documento de Adesão ao sistema de compensação de energia.

CLÁUSULA QUINTA: DO SISTEMA DE MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA

O sistema de microgeração compreende: **Gerador Fotovoltaico; 75 kW; 1 x inversor(es); GROWATT; Modelo: Growatt MAX 75KTL3 LV; 252 x módulos: JINKO; Modelo: JKM440M-6TL4-V; Total de Arranjos: 14; Área dos Arranjos(m²): 504; conectado ao sistema de distribuição através do transformador NQ21357730 suprido em 34,5kV através do circuito 31 da SE NIQUELANDIA.**

Ressalta-se que os equipamentos informados na época da carta de orçamento eram apenas provisórios para a avaliação da viabilidade do projeto, sendo alterados posteriormente. De modo geral, o documento contém as condições de segurança, do desligamento da interconexão e das responsabilidades no relacionamento operacional.

O procedimento seguinte foi a realização da Ligação Nova.

6.3 Ligação Nova

Mediante as informações prévias, foi elaborado um projeto de aprovação de uma subestação elevadora aérea de 75kVA, ligando a usina fotovoltaica que funciona em baixa tensão de 380V para a média tensão de 34,5kV. As pranchas do projeto aprovado estão apresentadas nas figuras 74-75.

O laudo de provação foi emitido no dia 19 de maio de 2022 sob a SS de número 125051520, sendo que o projeto possuía validade de 18 meses a partir da data de aprovação.

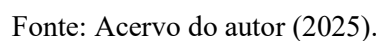
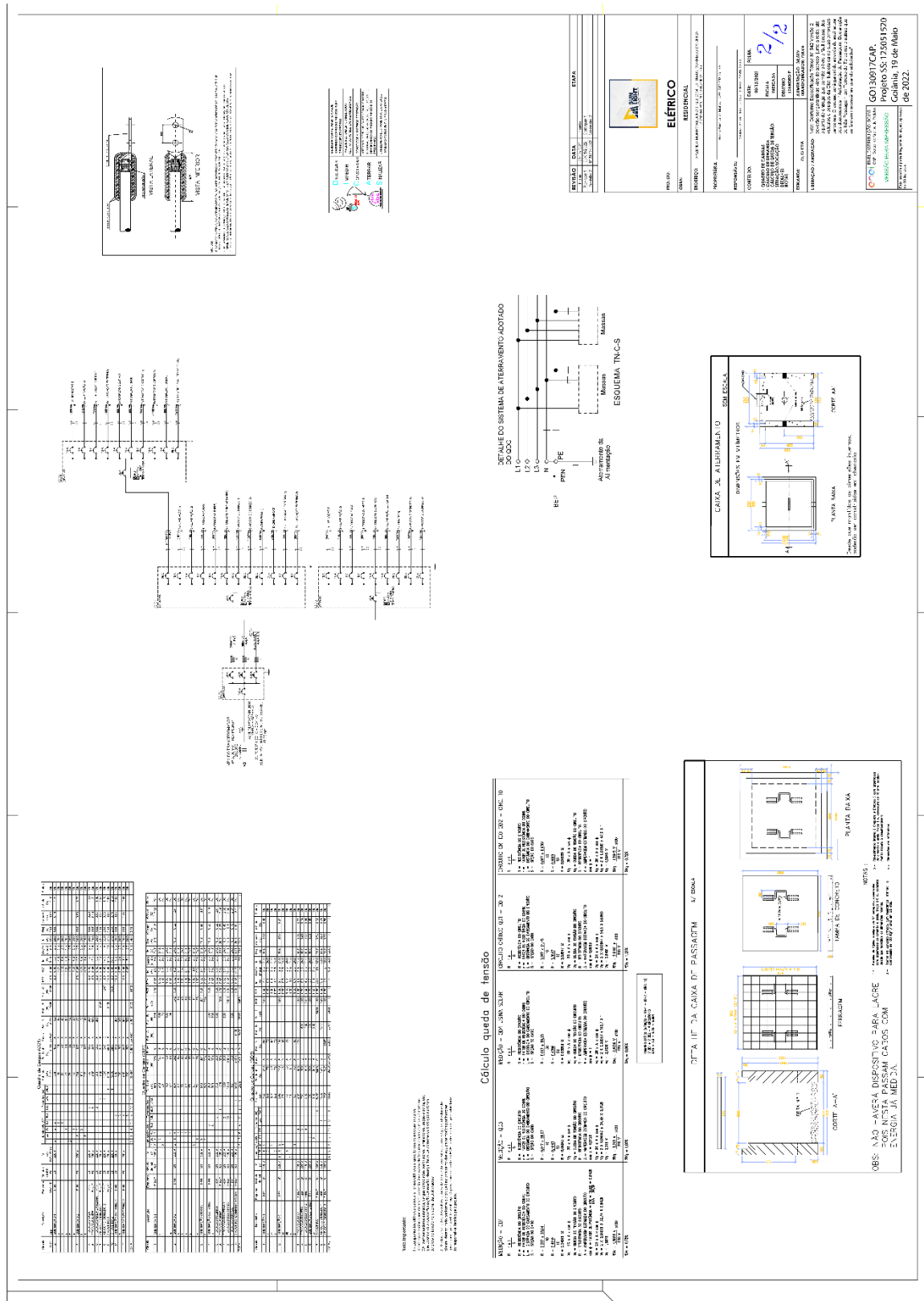


Figura 75. Projeto de Subestação Aérea de 75kVA - Prancha 2.



6.4 Solicitação de Acesso UFV

Para a realização de acesso à usina, foi emitido o formulário de solicitação de acesso para a microgeração distribuída com potência superior a 10 kW. O formulário de solicitação de acesso para a Microgeração Distribuída com os dados da unidade consumidora e a documentação anexada, está ilustrado na Figura 76.

Figura 76. Formulário de solicitação de acesso para a microgeração distribuída.

2 - Dados da Unidade Consumidora			
Potência instalada (kW):	10	Tensão de atendimento (V):	220/380
Tipo de conexão:	monofásica ☐	bifásica ☐	trifásica ☒
Tipo de ramal:	aéreo ☒	subterrâneo	☐
3 - Dados da Geração			
Potência instalada de geração (kW):	75		
Tipo da Fonte de Geração:			
Hidráulica ☐	Solar ☒	Eólica ☐	Biomassa ☐
Outra (especificar):	Cogeração Qualificada ☐		
4 - Documentação a Ser Anexada			
1. ART do Responsável Técnico pelo projeto elétrico e instalação do sistema de microgeração			☒
2. Projeto elétrico das instalações de conexão, memorial descritivo			☒
3. Diagrama unifilar e de blocos do sistema de geração, carga e proteção			☒
4. Certificado de conformidade do(s) inversor(es) ou número de registro da concessão do Inmetro do(s) inversor(es) para a tensão nominal de conexão com a rede.			☒
5. Dados necessários ao registro da central geradora conforme disponível no site da ANEEL: www.aneel.gov.br/scg			☒
6. Lista de unidades consumidoras participantes do sistema de compensação (se houver) indicando a porcentagem de rateio dos créditos e o enquadramento conforme incisos VI a VIII do art. 2º da Resolução Normativa nº 482/2012			☐
7. Cópia de instrumento jurídico que comprove o compromisso de solidariedade entre os integrantes (se houver)			☐
8. Documento que comprove o reconhecimento, pela ANEEL, da cogeração qualificada (se houver)			☐

Para a instalação do inversor, devem ser observados os seguintes cuidados:

- O fornecimento garante a desconexão da central geradora durante a manutenção do sistema da concessionária;
- Quando for realizada a vistoria, o relatório deve apresentar as características finais de instalação de conexão, além dos ensaios, resultados e testes realizados, todos devidamente assinados pelo engenheiro responsável;
- O aterramento do sistema de geração deve ser conectado ao sistema de aterramento da unidade consumidora;
- A potência nominal dos inversores deve estar de acordo com o rendimento de geração dos módulos fotovoltaicos;
- Os inversores devem estar em locais de fácil localização e manejo, protegidos pelos diversos intempéries, de acordo com o seu grau de proteção (IP).

A próxima fase compreende a apresentação do Projeto de Aprovação da Usina Fotovoltaica, ilustrado nas figuras 77-79.

Figura 77. Projeto de aprovação da Usina Fotovoltaica - Prancha 1.

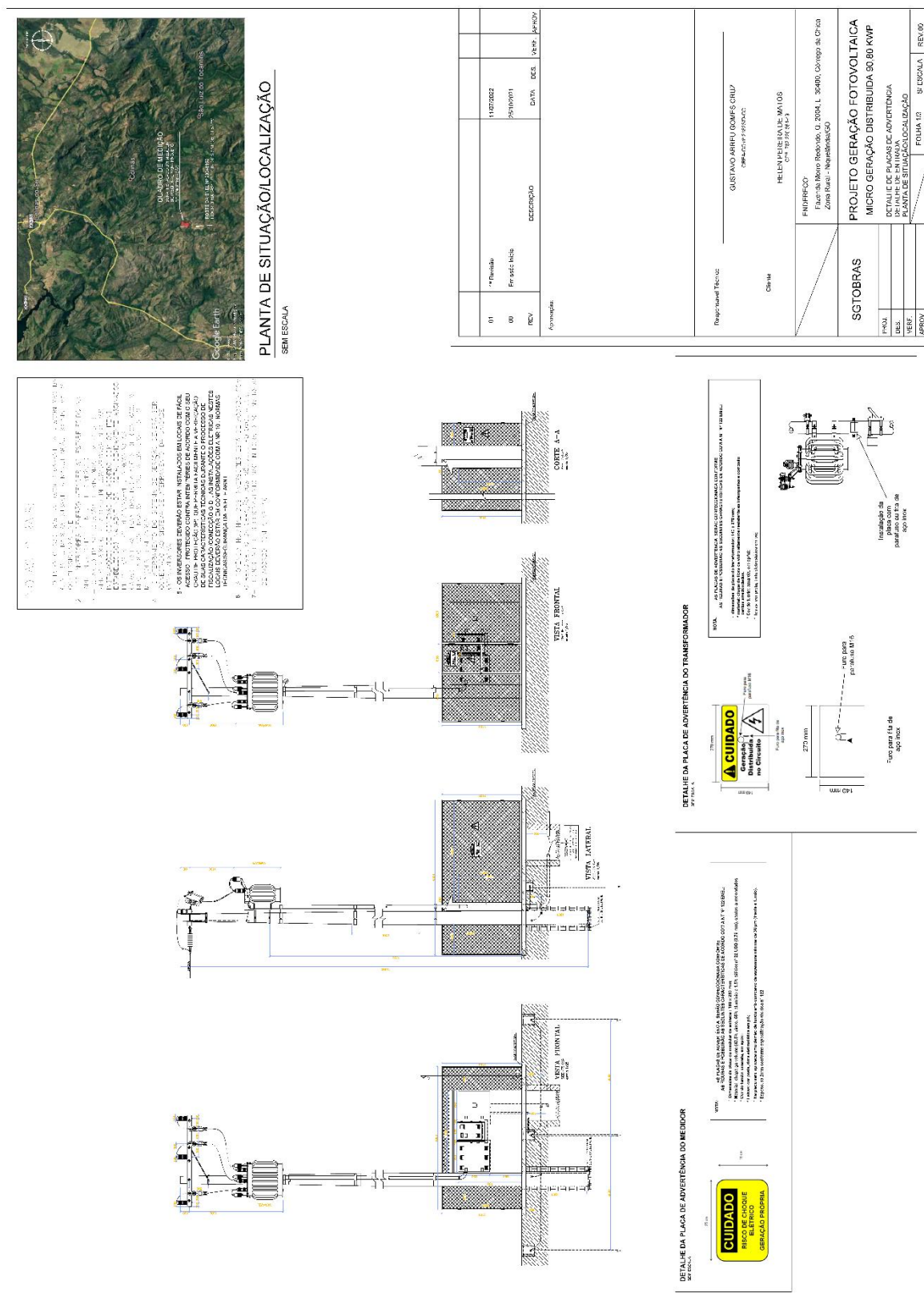


Figura 78. Projeto de aprovação da Usina Fotovoltaica - Prancha 2.

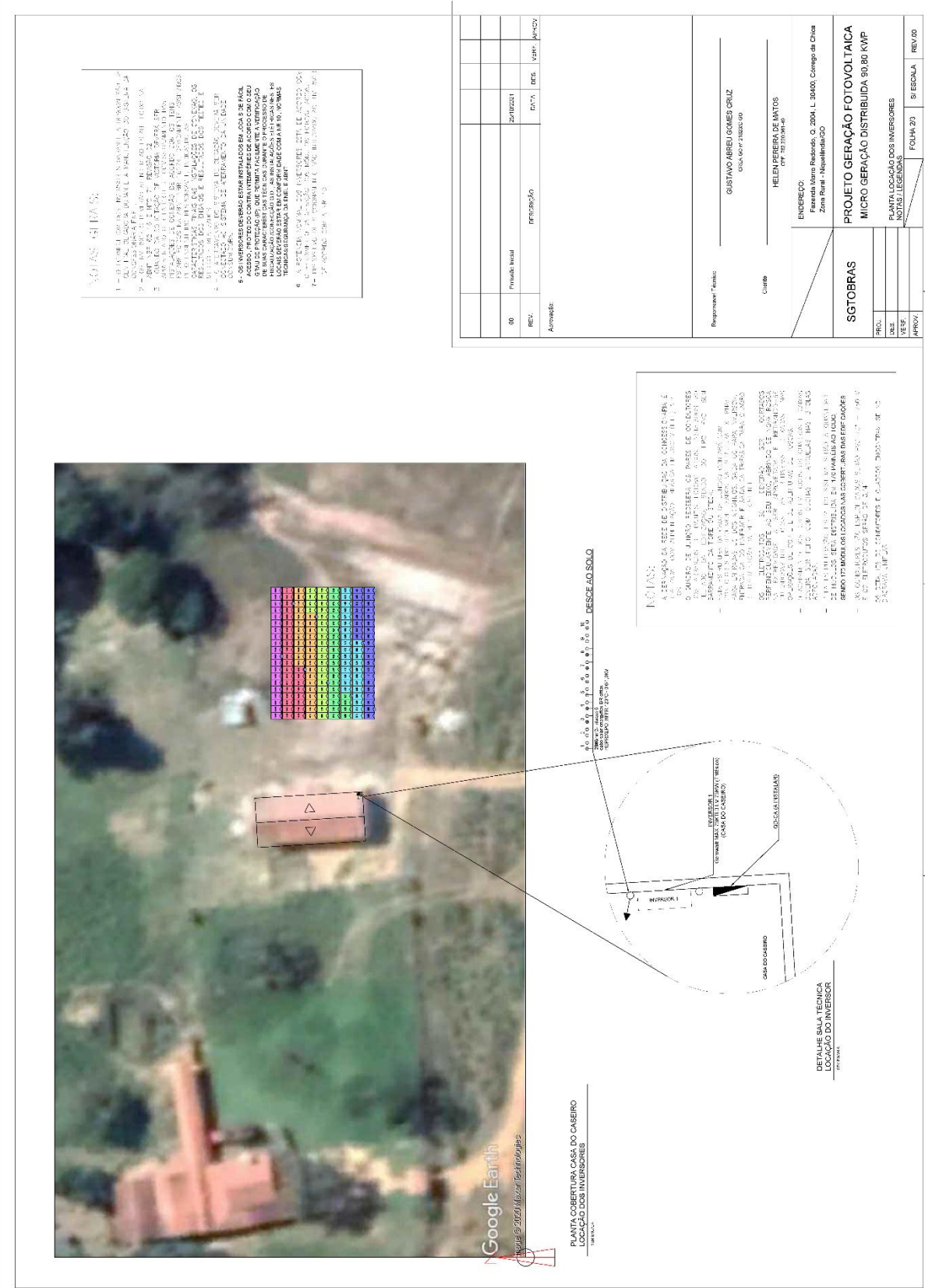
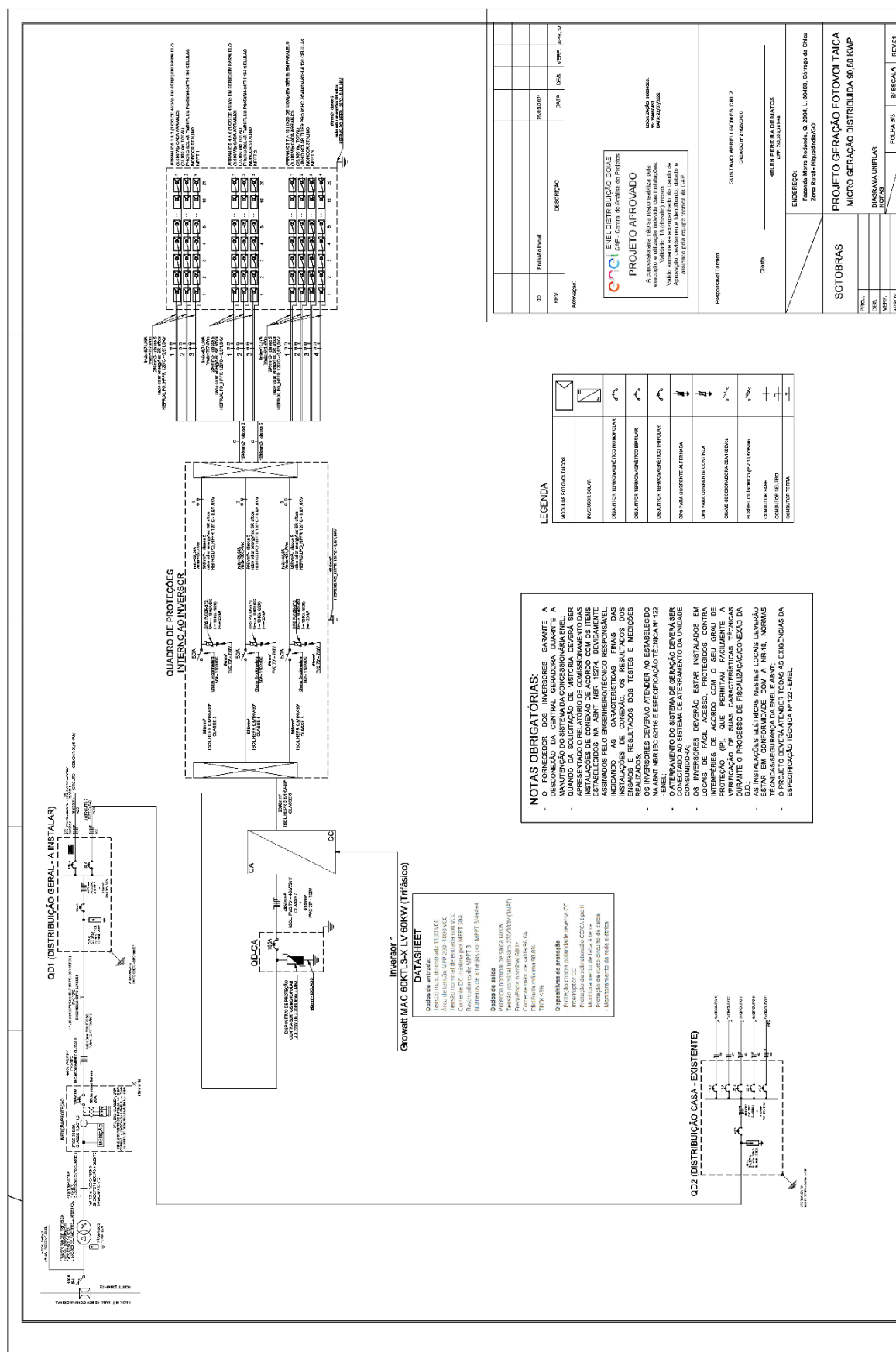


Figura 79. Projeto de aprovação da Usina Fotovoltaica – Prancha 3.



O laudo de aprovação foi emitido no dia 21 de julho de 2022 sob SS de número 134660431, sendo que o projeto teria o prazo de 120 dias contados a partir da emissão do parecer de acesso.

7 EXECUÇÃO DA UFV MORRO REDONDO

Neste capítulo são apresentados os procedimentos de execução da usina fotovoltaica e da subestação. Além disso, será abordada a execução da extensão de rede de responsabilidade da concessionária de energia.

7.1 Execução da Usina Fotovoltaica

Para a realização do projeto da usina, foram listadas algumas planilhas orçamentárias em relação aos materiais elétricos utilizados, conforme ilustrado na Figura 80:

Figura 80. Materiais Elétricos Utilizados no Projeto.

DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	UNIDADE	QUANTIDADE
Quadro de Distribuição	un	1,00
Barramento tipo Espinha de Peixe 150A 16 disjuntores	un	1,00
Disjuntos Trifásico 125A	un	1,00
Disjuntor Trifásico 100A	un	1,00
Disjuntos Trifásico 40A	un	1,00
DPS In 20kA Imáx 45kA	un	4,00
Terminal regulável tipo pino para cabo 50mm ²	un	8,00
Terminal regulável tipo pino para cabo 35mm ²	un	5,00
Terminal regulável tipo pino para cabo 10mm ²	un	5,00
Barramento Neutro	un	1,00
Barramento Terra	un	1,00
Eletroduto Flexível Subterrâneo 1.1/4" rolo 50m	un	1,00
Haste de aterramento de cobre nu 2,4m	un	16,00
Conector da cabeça da haste de aterramento	un	16,00
Cordoalha de cobre nu 16mm ²	m	90,00
Cabo flexível 750V 35mm ² preto	m	9,00
Cabo flexível 750V 35mm ² azul	m	3,00
Cabo flexível 750V 16mm ² verde	m	3,00

Fonte: Acervo do autor (2025).

Para demonstrar a rentabilidade do projeto, foi realizado um orçamento com os custos associados. A Figura 81 ilustra a planilha orçamentária para a primeira etapa do projeto.

Figura 81. Planilha orçamentária para a primeira etapa.

Código	Descrição	U.M.	Qtd	Valor R\$
1	SERVIÇOS PRELIMINARES E GERAIS			
1.1	Terraplenagem			
1.1.1	Limpeza e terraplenagem do terreno para receber as estruturas dos módulos fotovoltaicos	h	4,00	
1.2	Fundação			
1.2.1	Perfuração do terreno (1,5 m de profundidade) para recebimento das estruturas de fundação	un	60,00	
1.2.2	Retroescavadeira ou Bobcat	h	4,00	
1.2.3	Martelete Rompedor de rocha	h	4,00	
1.2.4	Concreto Fck 300 kgf/cm²	m³	6,36	
1.2.5	Armadura em aço $\phi 3/8"$ CA 50 B	m	336,00	
1.2.6	Estribos em aço $\phi 1/4"$ CA 50 B	m	522,00	
1.2.7	Betoneira	dia	4,00	
1.3	Aterramento			
1.3.1	Cordoalha de Cobre Nu 50mm²	m	150,00	
1.3.2	Haste de aterramento cobre nu 2,40m	un	50,00	
1.4	Alambrado			
1.4.1	Alambrado em mourões de concreto "T", com tela de arame galvanizado. Fio 14 BWG e malha quadrada 5x5cm	m²	300,00	
1.5	Drenagem			
1.5.1	Brita Nº1 para drenagem do terreno	m²	300,00	
1.6	Eletrodutos			
1.6.1	Eletroduto PVC Flexível Preto 2" da entrada até o equipamento de conversão	m	80,00	
1.7	Cabeamento			
1.7.1	Cabo Flexível 50.0mm² Preto (750V)	m	150,00	
1.7.2	Cabo Flexível 50.0mm² Azul (750V)	m	50,00	
1.7.3	Cabo Flexível 16.0mm Verde (750V)	m	50,00	
TOTAL DO ITEM				A cargo do cliente
2	GERADOR FOTOVOLTAICO 54KWp			
2.1	Conectores e Terminais			
2.1.1	STAUBLI CONECTOR MC4 320016P0001-UR PV-KBT4/6II-UR ACOPLADOR FEMEA	un	30,00	
2.1.2	STAUBLI CONECTOR MC4 32.0017P0001-UR PV-KST4/6II-UR ACOPLADOR MACHO	un	30,00	
2.1.3	Terminal Tubular para cabo 10,0mm²	un	30,00	
2.1.4	Terminal Pino para cabo 50,0mm²	un	20,00	
2.1.5	Terminal tipo Olhal 10mm²	un	250,00	
2.2	Estrutura de Fixação			
2.2.1	ESTRUTURA SOLAR ROMAGNOLE 411738 RS-232 ACESSORIOS TERRESTRE 4 PAINEIS	pct	30,00	
2.2.2	ESTRUTURA SOLAR ROMAGNOLE 412017 RS-232C 4 PAINEIS SOLO TERRESTRE 4,80M INCLINACAO 5 A 30 GRAUS	pct	30,00	
2.3	Eletrodutos			
2.3.1	Eletroduto PVC Flexível Preto 2"	m	250,00	
2.3.3	Luva PVC Preto 2"	un	50,00	
2.3.4	Tampa Cega 40x40	un	20,00	
2.3.5	Caixa de Passagem Embutir 40x40	un	20,00	
2.4	Cabeamento			
2.4.1	CABO SOLAR NEXANS 59056 ENERGYFLEX AFITOX 0,6/1KV 1500V DC PRETO	m	300,00	
2.4.2	CABO SOLAR NEXANS 40553 ENERGYFLEX AFITOX 0,6/1KV 1500V DC VERMELHO	m	300,00	
2.4.3	Cabo Flexível 50.0mm² Preto (750V)	m	90,00	
2.4.4	Cabo Flexível 50.0mm² Azul (750V)	m	30,00	
2.4.5	Cabo Flexível 16.0mm Verde (750V)	m	30,00	
2.5	Inversor			
2.5.1	INVERSOR SOLAR GROWATT ON GRID MAC60KTL3-X LV 60KW TRIFASICO 380V 3MPPT 12 ENTRADAS MONITORAMENTO	un	1,00	
2.6	Painel Fotovoltaico			
2.6.1	PAINEL SOLAR PHONO PS450M4H-24TH 450W 144 CEL. MONO PERC HALF CELL 20,67% EFICIENCIA	un	120,00	
2.7	Proteções			
2.7.1	DPS 25KA/40KA FASE	un	3,00	
2.7.2	DPS 25KA/40KA NEUTRO	un	1,00	
2.7.3	Disjuntor Trifásico 125A	un	1,00	
2.8	Sinalização			
2.8.1	Placa aço não refletiva 25X18CM - Pintada - Amarelo	un	2,00	
2.8.2	Placa fibra de vidro não refletiva - Pintada - Branca	un	1,00	
TOTAL DO ITEM				R\$ 175.500,00
3	PROJETO, INSTALAÇÃO E COMISSIONAMENTO			
3.1	Projeto e Aprovação			
3.1.1	Projeto, aprovação e demais liberações necessárias para o funcionamento legal da usina			
3.2	Instalação			
3.2.1	Mão-de-obra de instalação mecânica e elétrica dos módulos e equipamentos componentes do gerador fotovoltaico, assim como a execução do aterramento	h	115,00	
3.3	Comissionamento			
3.3.1	Comissionamento e testes no sistema instalado	h	4,00	
TOTAL DO ITEM				R\$ 40.000,00
TOTAL MATERIAL				R\$ 175.500,00
TOTAL MÃO-DE-OBRA				R\$ 40.000,00
CUSTO TOTAL DE IMPLANTAÇÃO				R\$ 215.500,00

Fonte: Acervo do autor (2025).

A planilha orçamentária da etapa de ampliação do projeto está ilustrada na Figura 82.

Figura 82. Planilha orçamentária da ampliação.

Código	Descrição	U.M.	Qtd	Valor R\$
1	GERADOR FOTOVOLTAICO 36KWp			
1.1	Conectores e Terminais			
1.1.1	STAUBLI CONECTOR MC4 320016P0001-UR PV-KBT4/6II-UR ACOPLADOR FEMEA	un	12,00	
1.1.2	STAUBLI CONECTOR MC4 32.0017P0001-UR PV-KST4/6II-UR ACOPLADOR MACHO	un	12,00	
1.2	Estrutura de Fixação			
1.2.1	ESTRUTURA SOLAR ROMAGNOLE 411738 RS-232 ACESSORIOS TERRESTRE 4 PAINEIS	pct	20,00	
1.2.2	ESTRUTURA SOLAR ROMAGNOLE 412074 RS-232CA 4 PAINEIS SOLO TERRESTRE 4,80M INCLINACAO 5 A 30 GRAUS	pct	20,00	
1.3	Eletrodutos			
1.3.1	Eletroduto PVC Flexível Preto 2"	m	40,00	
1.3.2	Luva PVC Preto 2"	un	30,00	
1.3.3	Tampa Cega 40x40	un	3,00	
1.3.4	Caixa de Passagem Embutir 40x40	un	3,00	
1.4	Cabeamento			
1.4.1	CABO SOLAR NEXANS 43221 ENERGYFLEX AFITOX 0,6-1KV 1500V DC VERMELHO	m	100,00	
1.4.2	CABO SOLAR NEXANS 47064 ENERGYFLEX AFITOX 0,6-1KV 1500V DC PRETO	m	100,00	
1.5	Painel Fotovoltaico			
1.5.1	PAINEL SOLAR JINKO JKM460M-60HL4-V 460W TIGER PRO MONO PERC HALF CEL 21,32% EFIC 120 CEL	un	80,00	
TOTAL DO ITEM				R\$ 116.500,00
2	PROJETO, INSTALAÇÃO E COMISSIONAMENTO			
2.1	Instalação			
2.1.1	Mão-de-obra de instalação mecânica e elétrica dos módulos e equipamentos componentes do gerador fotovoltaico, assim como a execução do aterramento	h	75,00	
2.2	Comissionamento			
2.2.1	Comissionamento e testes no sistema instalado	h	4,00	
TOTAL DO ITEM				R\$ 20.000,00
TOTAL MATERIAL				R\$ 116.500,00
TOTAL MÃO-DE-OBRA				R\$ 20.000,00
CUSTO TOTAL DE IMPLANTAÇÃO				R\$ 136.500,00

Fonte: Acervo do autor (2025).

Com isso, foi elaborado o projeto executivo da infraestrutura da usina. Dentro do projeto foram trabalhados os seguintes pontos:

- a. Aterramento
- b. Alambrado
- c. Fundação
- d. Eletroduto
- e. Quadro elétrico.

A área total da usina fotovoltaica corresponde a 1.291,05 m², datada em abril de 2022. O projeto para execução do aterramento está ilustrado na Figura 83.

Figura 85. Locação da fundação.

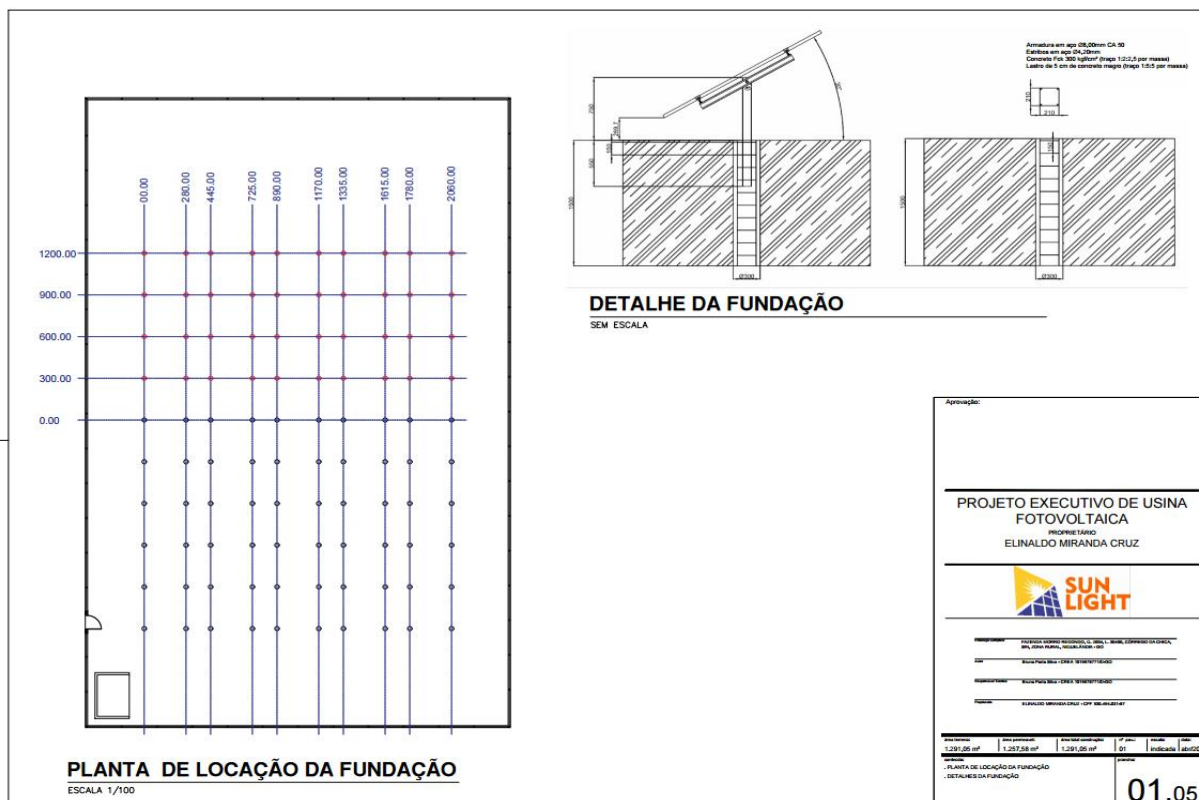


Figura 86. Planta Baixa das instalações.

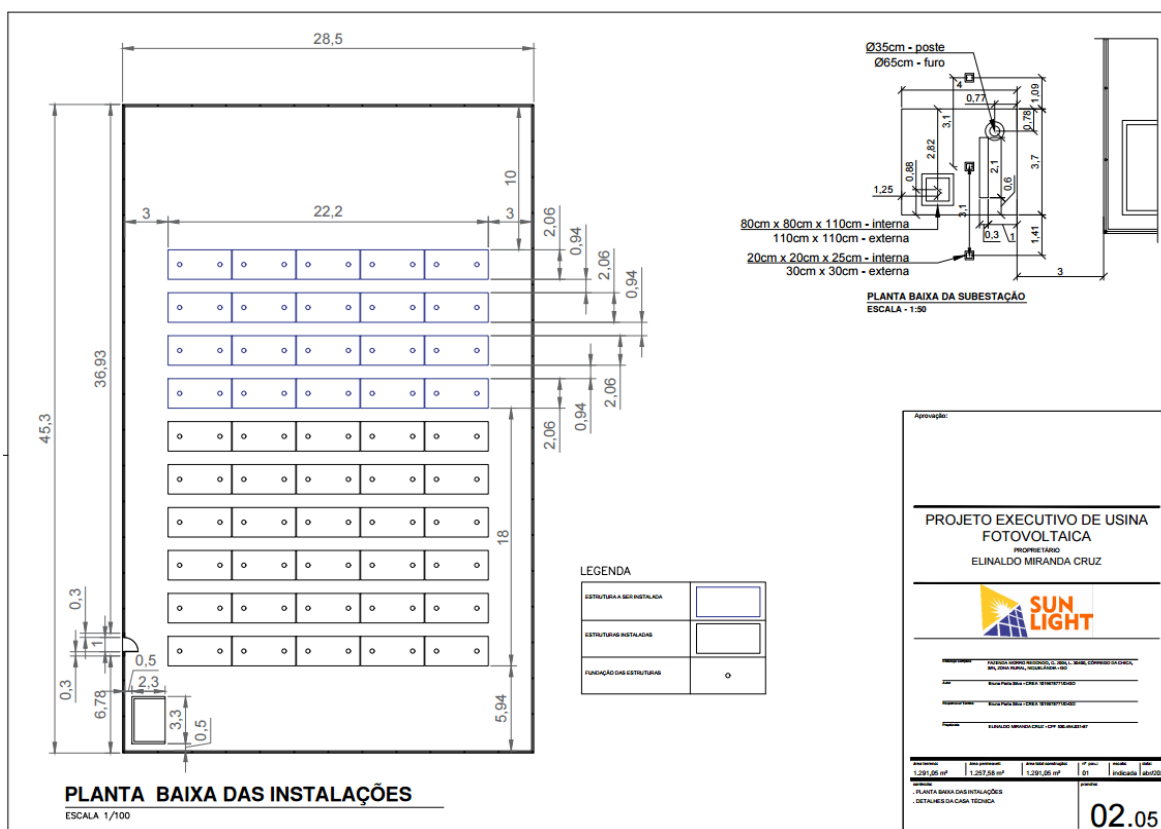


Figura 87. Planta Baixa do alambrado.

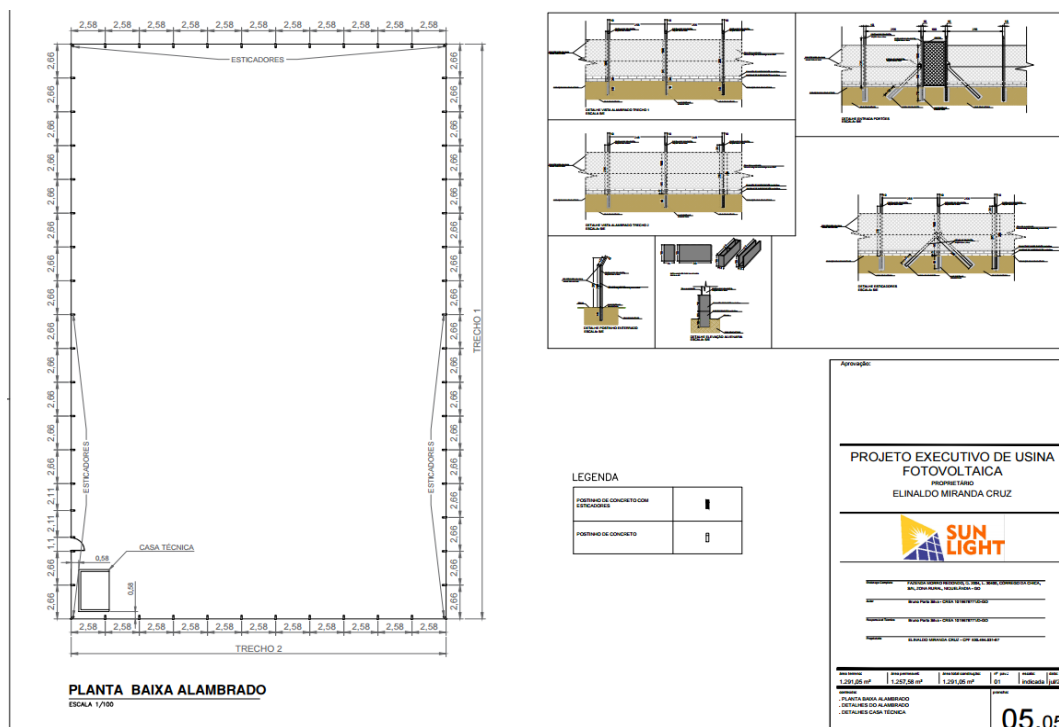
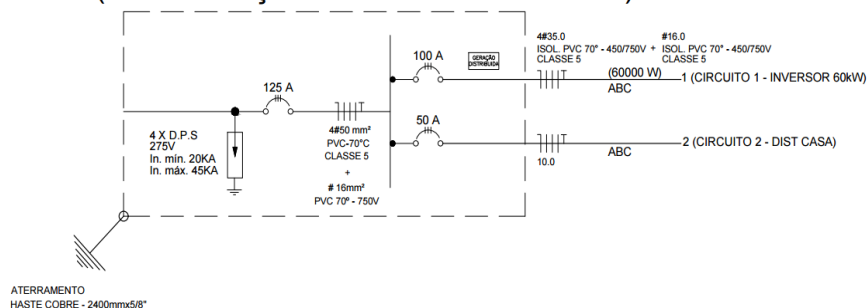


Figura 88. Quadro de Distribuição Geral.

QD1 (DISTRIBUIÇÃO GERAL - A INSTALAR)



O valor a ser investido no projeto, pode ser estimado por meio das figuras 82-88. Os projetos permitem obter dados relacionados ao aterramento, fundação, alambrado, eletrodutos e componentes do quadro elétrico.

As usinas elétricas são classificadas quanto ao porte/conexão. A denominação Geração Distribuída (GD) representa usinas que operam até 5 MW, que incluem o consumo local, com geração de energia compartilhada. Por outro lado, Geração Centralizada (GC), representa usinas bem maiores, que geram energia com a finalidade de abastecer o mercado e comercializar livremente, com conexão e transmissão da rede.

A usina fotovoltaica construída neste projeto, classificada como Geração Distribuída (GD), está ilustrada nas figuras 89-96.

Figura 89. Usina Fotovoltaica concluída – vista aérea 1.



Figura 90. Usina Fotovoltaica concluída – vista aérea 2.



Figura 91. Usina Fotovoltaica concluída – detalhe do alambrado.



Figura 92. Usina Fotovoltaica concluída – detalhe do sombreamento 1.



Figura 93. Usina Fotovoltaica concluída – detalhe do sombreamento 2.



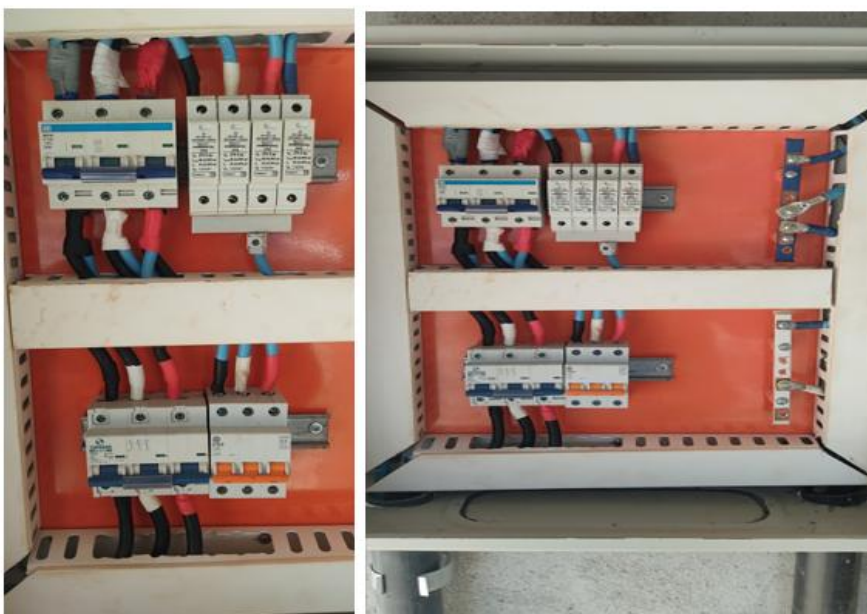
Figura 94. Usina Fotovoltaica concluída – detalhe da subestação.



Figura 95. Usina Fotovoltaica concluída – abrigo do Inversor e do Quadro de Distribuição.



Figura 96. Usina Fotovoltaica concluída – Quadro de Distribuição.



7.2 Execução da Subestação

A instalação da subestação com capacidade de 75 kVA foi realizada pela empresa Drumon Engenharia. A proposta de orçamento encaminhada pela empresa está ilustrada na Figura 97.

Figura 97. Proposta de Orçamento para a instalação da Subestação de 75kVA.

Atendendo a solicitação de V. S., apresentamos nas melhores condições comerciais, nossa PROPOSTA para vossa apreciação.

1. OBJETO DA PROPOSTA:

ITEM	SERVIÇOS PROPOSTOS - SUBESTAÇÃO TRANSFORMADORA DE 75KVA	LOCAL
1	Visita Técnica;	NIQUELANDIA GOIAS
1.1	Levantamento Técnico;	
1.1.2	Acompanhamento e Assessoria;	
1.1.3	Documentações junto a ENEL	
1.1.4	Materiais e Mão-de-Obra para instalação/execução da subestação transformadora de 75KVA;	
1.1.5	ART's de Execução da Obra;	
VALOR		R\$ 48.915,68

Acrescido ao custo de instalação de aproximadamente 49 mil reais, foi incluído o transformador com valor de R\$ 16.800,00. A proposta para obtenção do equipamento foi realizada no dia 17/12/2021, e as especificações estão ilustradas na Figura 98

Figura 98. Orçamento do Transformador de Potência de 75kVA.

EXIMIA MULT SERVICE CNPJ: 01.373.222/0001-12 DA REPUBLICA 130, 130 - SALA 804 75503-900			6230937484 ELINALDOCRUZ@GMAIL.COM EDIF EXECUTIVO - CENTRO - Itumbiara - GO - CEP:	Validade da proposta 17/12/2021 Previsão de entrega 17/12/2021
Qt.	Produto/Serviço	Detalhe do item	Valor unitário	Subtotal
1	TT7534380 - Transformador; Trifásico; Potência 75 kVA, Classe 36 kV.	Transformador de potencia 75 KVA Classe de isolamento 36 kv, Dyn 1, Substrativa, ONAN , Tensão primária (34.500V) , ligação triângulo, NBI 110/30 KV, 60 HZ , Tensão Secundária 380/220Volts Ligação Estrela, C/ Neutro Acessível, Isolado a óleo mineral parafínico, Instalação em Poste, Acessórios conforme NBR 5350 , Padrão ENEL C/ LAUDO , Marca EMB Transformadores.TRANSFOMADOR COM CAIXA MUFLA DE BT(FLANGEADO)	16.800,00	16.800,00
			Total	16.800,00
			Valor líquido	16.800,00

Ressalta-se que foram analisadas diferentes propostas para instalação da subestação, apresentadas na Tabela 23. A melhor proposta foi apresentada pela empresa Drummond Engenharia. A aquisição do transformador foi realizado pela Adeel Materiais Elétricos, com orçamento apresentado na Tabela 24.

Tabela 23. Propostas Orçamentárias para Instalação da Subestação de 75kVA.

Empresa	Ações empregadas	Orçamento (R\$)
Energética Goiás (Goiânia)	Instalação Eletromecânica da subestação de 75kVA Fornecimento de materiais elétricos e de construção civil para a construção da mureta de medição com uma caixa de passagem Mão-de-obra para obras elétricas e civis Não contempla o custo de fornecimentos dos cabos de cobre na saída do disjuntor	78.400,00
3A Engenharia (Cidade de Goiás)	Instalação Eletromecânica da subestação de 75kVA Fornecimento de materiais elétricos e de construção civil para a construção da mureta de medição com uma caixa de passagem Mão-de-obra para obras elétricas e civis; Não contempla o custo de fornecimentos dos cabos de cobre na saída do disjuntor	110.000,00
Eletroforte (Goiânia)	Instalação da subestação de 75kVA Fornecimento de materiais elétricos Mão-de-obra para obras elétricas Não contempla o custo de fornecimentos dos cabos de cobre na saída do disjuntor	75.500,00
Drumon Engenharia (Goiânia) -	Instalação Eletromecânica da subestação de 75kVA Fornecimento de materiais elétricos, exceto o TRANSFORMADOR Mão-de-obra para obras elétricas Não contempla o custo de fornecimentos dos cabos de cobre na saída do disjuntor Não incluso materiais de alvenaria e ferragens	48.915,68

Tabela 24. Proposta Orçamentária para o Transformador de 75kVA.

Empresa	Equipamento	Orçamento (R\$)
Adeel Materiais Elétricos	Transformador Trifásico a óleo ENEL 75 kVA 34,5kV 380/220V com Caixa Mufla de BT	16.800,00

Os detalhes da subestação estão ilustrados nas figuras 99-101.

Figura 99. Subestação de 75kVA – detalhe da alvenaria e alambrado.

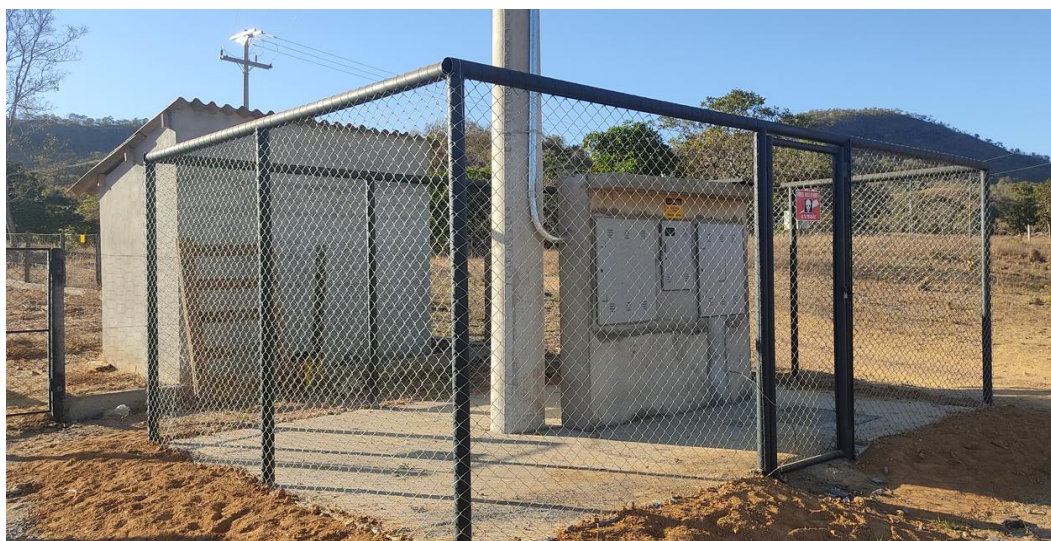


Figura 100. Subestação de 75kVA – detalhe do Transformador.



Figura 101. Subestação de 75kVA – detalhe do Quadro de Distribuição.



7.3 Execução da Extensão de Rede

O documento referente à responsabilidade da concessionária para executar a extensão da rede está ilustrado na Figura 102

Figura 102. Responsabilidade da Concessionária para a extensão da rede.

A **Enel Distribuição Goiás** informa que o HELEN PEREIRA DE MATOS se encontra com estudo de viabilidade técnica emitido **AVT N°** OC365575642 projetos de suas instalações internas aprovados **Projeto SS N°** 124771175 solicitação de fornecimento realizada, carta de orçamento/prazos emitida e participação financeira do cliente já acertada, via boleto bancário, junto a **Enel Distribuição Goiás**.

Assim sendo, o presente documento celebra o compromisso da **Enel Distribuição Goiás** em executar a infraestrutura do sistema elétrico até as proximidades do ponto de entrega previsto no projeto das instalações internas aprovado **Projeto N°** 124771175 até a data de **09/11/2021**, o que possibilitará à efetiva conexão e energização do HELEN PEREIRA DE MATOS.

A extensão da rede realizada pela concessionária ENEL está apresentada na Figura 103.

Figura 103. Extensão da rede realizada pela concessionária ENEL.



7.4 Análise dos Resultados de Geração da Usina

A usina fotovoltaica iniciou a geração de energia em março de 2003. Os resultados de geração de energia mensal, obtidos no período 03/2003 a 12/2025, estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25. Produção de energia da usina fotovoltaica (2023 a 2025).

Ano/Mês	Produção (kWh)	Ano/Mês	Produção (kWh)	Ano/Mês	Produção (kWh)
		2024/01	9.674,30	2025/01	9.904,70
		2024/02	9.671,10	2025/02	9.713,10
2023/03	8.034,30	2024/03	10.794,70	2025/03	11.944,20
2023/04	10.000,60	2024/04	10.311,40	2025/04	10.834,70
2023/05	3.853,30	2024/05	12.929,10	2025/05	11.739,70
2023/06	9.316,20	2024/06	11.442,90	2025/06	11.631,10
2023/07	11.568,30	2024/07	11.639,30	2025/07	11.739,70
2023/08	10.243,20	2024/08	11.430,10	2025/08	11.739,30
2023/09	12.511,10	2024/09	10.848,10	2025/09	10.797,20
2023/10	12.212,30	2024/10	9.747,10	2025/10	11.253,00
2023/11	11.588,30	2024/11	8.817,30	2025/11	10.063,00
2023/12	11.897,90	2024/12	10.164,40	2025/12	7.275,30
Média mensal	10.122,55	Média mensal	10.622,48	Média mensal	10.719,58
Geração Total	101.225,50	Geração Total	127.469,80	Geração Total	128.635,00

Considerando a produção de energia anual em 2024, $E_{anual} = 127.469,80 \text{ kWh}$, e em 2025, $E_{anual} = 128.635,00 \text{ kWh}$, chegou-se a uma média $E_{anual} = 128.052,40 \text{ kWh/ano}$. Comparando com o valor estimado, obtido pela Eq. 18, $E_{anual} = 132.796,1 \text{ kWh/ano}$, observa-se um desvio de 3,57 % em relação ao valor calculado.

Os gráficos correspondentes à geração de energia mensal estão apresentados nas figuras 104-106.

Figura 104. Geração mensal da usina fotovoltaica em 2023.

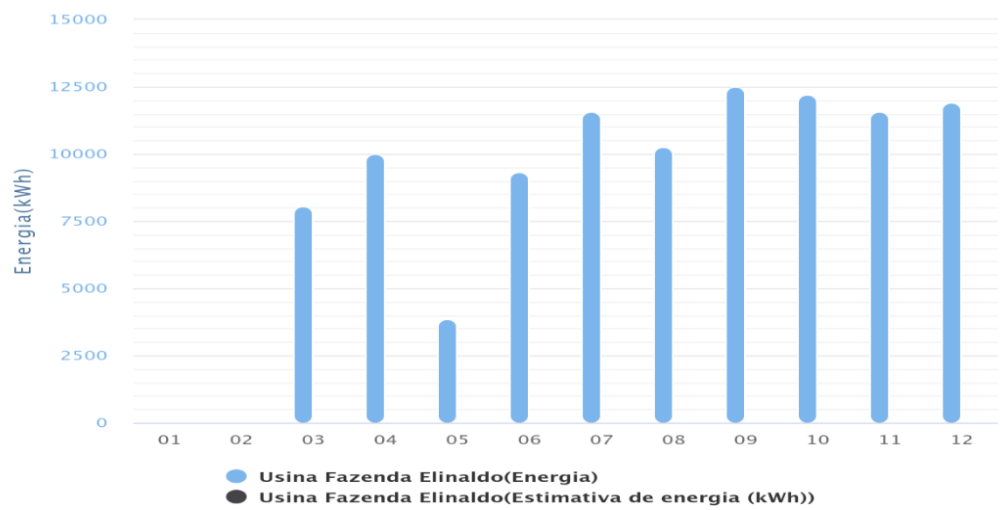


Figura 105. Geração mensal da usina fotovoltaica em 2024.

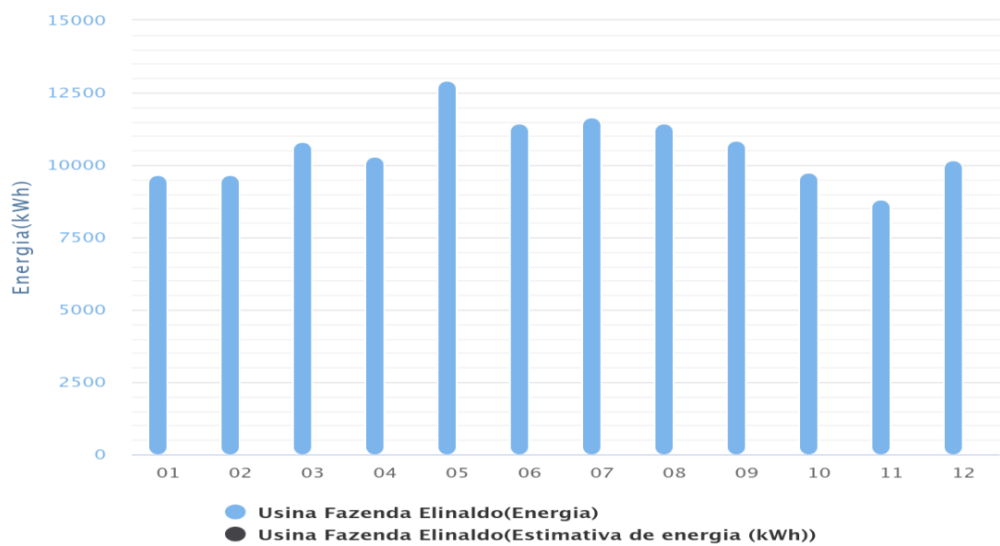
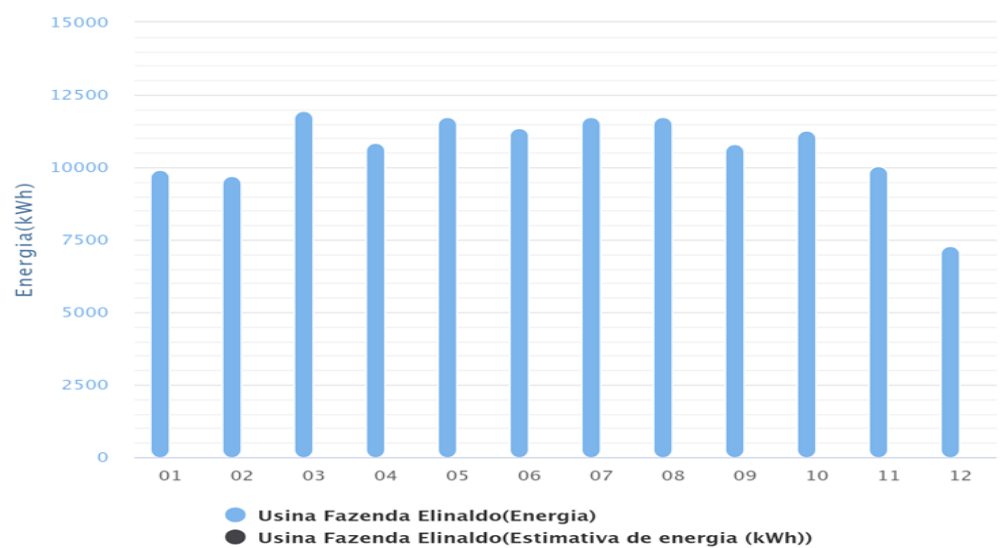


Figura 106. Geração mensal da usina fotovoltaica em 2025.



O valor economizado com a geração da usina, no período de 03/2023 a 12/2025, considerando a produção mensal de energia e o valor médio da tarifa de energia está apresentado na Tabela 26.

Tabela 26. Valor Economizado – 2023 a 2025.

Ano/Mês	Produção (kWh)	Valor Médio da Tarifa de Energia (R\$)	Valor Economizado (R\$)
2023/03	8.034,30	0,8447	6.786,69
2023/04	10.000,60	0,8447	8.447,65
2023/05	3.853,30	0,8447	3.254,94
2023/06	9.316,20	0,8447	7.869,52
2023/07	11.568,30	0,8447	9.771,90
2023/08	10.243,20	0,8447	8.652,57
2023/09	12.511,10	0,8447	10.568,30
2023/10	12.212,30	0,8447	10.315,90
2023/11	11.588,30	0,8447	9.788,80
2023/12	11.897,90	0,8447	10.050,32
2024/01	9.674,30	0,8553	8.274,20
2024/02	9.671,10	0,8553	8.271,46
2024/03	10.794,70	0,8553	9.232,45
2024/04	10.311,40	0,8553	8.819,09
2024/05	12.929,10	0,8553	11.057,95
2024/06	11.442,90	0,8553	9.786,84
2024/07	11.639,30	0,8553	9.954,81
2024/08	11.430,10	0,8553	9.775,89
2024/09	10.848,10	0,8553	9.278,12
2024/10	9.747,10	0,8553	8.336,46
2024/11	8.817,30	0,8553	7.541,23
2024/12	10.164,40	0,8553	8.693,37
2025/01	9.904,70	0,9395	9.305,14
2025/02	9.713,10	0,9395	9.125,14
2025/03	11.944,20	0,9395	11.221,18
2025/04	10.834,70	0,9395	10.178,84
2025/05	11.739,70	0,9395	11.029,06
2025/06	11.631,10	0,9395	10.927,03
2025/07	11.739,70	0,9395	11.029,06
2025/08	11.739,30	0,9395	11.028,68
2025/09	7.071,00	0,9395	6.642,97
2025/10	11.253,00	0,9395	10.572,19
2025/11	10.063,00	0,9395	9.454,19
2025/12	7.275,30	0,9395	6.835,14
Valor Economizado Total			R\$ 315.378,08

No período observado, de 03/2023 a 12/2025, a geração da usina permitiu uma economia de R\$ 315.378,08.

Os valores pagos para a execução da usina totalizaram R\$ 417.715,68, desconsiderando os custos de infra-estrutura civil que ficaram a cargo do cliente, pode-se concluir que 75,50% da usina foi paga pela produção, em apenas 34 meses de operação.

Desconsiderando o efeito da inflação e variações no valor da tarifa média mensal de energia cobrada pela concessionária, e considerando essa mesma média de retorno, pode-se inferir que a usina se pagará por completo nos próximos 12 meses de geração. Isto represente que geração fotovoltaica pela usina obterá o retorno de investimento em um período de apenas 46 meses.

7.5 Considerações Finais

Sem dúvida, a produção de energia limpa, renovável é algo que apresenta mínimos impactos à natureza. Neste caso, a energia solar é uma fonte natural, ainda mais pelo fato que o Brasil conta com localização geográfica privilegiada, onde a incidência solar acontece praticamente o ano todo.

Em relação ao trabalho de campo, a construção da usina fotovoltaica foi realmente um desafio. O que foi empregado neste projeto veio simplesmente do que foi aprendido na teoria e aplicado na prática. A Fazenda Morro Redondo foi esse palco em que foram utilizados softwares, cálculos manuais e cálculos estimados para execução do projeto da melhor forma possível.

Na execução do projeto, ocorreram diversas dificuldades. Iniciando com a fase de negociações, principalmente relacionadas à compra do inversor de frequência, onde se demonstrou que melhor opção seria a aquisição de um inversor de qualidade superior, com potência acima do necessário para o projeto, mesmo com um valor bem acima dos demais encontrados no mercado.

Na fase de execução, a concessionária de energia elétrica, Equatorial, levou mais de um ano para realizar a execução do projeto, vencendo o prazo e solicitando novamente um novo pedido para AVT.

Na etapa da vistoria, quando a Equatorial foi fazer a vistoria da subestação ligando apenas duas fases, não explicando ou dando resposta para ligar as três fases, tendo um prejuízo para o cliente depois de 1 mês e meio para ligar todas as fases, fazendo uma revisão do projeto, e fazendo uma vistoria do projeto solar.

A contratação e obtenção de mão-de-obra para execução do projeto foi muito difícil, pois o número de profissionais está cada vez mais escasso. Adicionalmente, destaca-se a burocracia existente no país para construção de projetos assim, dependendo do projeto, da sua escala e/ou tamanho, a rigidez legal é extremamente elevada, o que impacta profundamente no valor investido pelo cliente.

Em relação ao dimensionamento da usina fotovoltaica, pode ser observado uma diferença entre os valores obtidos pelo software, pelo dimensionamento manual e os valores reais de geração. Quando comparados, o software apresentou um erro de 12,20% a mais de energia gerada quando comparado à geração real, enquanto o dimensionamento manual apresentou 3,57% de erro para mais também. Isto revela a necessidade de trabalhar com fatores de segurança ao se dimensionar uma usina fotovoltaica, para que o cliente não tenha surpresas negativas ao investir num sistema que não forneça a quantidade de energia que ele necessita.

Em relação ao retorno do investimento, foi possível observar que atualmente a geração da usina já pagou aproximadamente 75,50% do investimento realizado, sendo o seu *payback*, ou seja, o seu retorno financeiro, estimado em 46 meses de operação, desconsiderando eventuais custos de manutenção. Tendo em vista que o sistema possui uma duração estimada de 25 anos de funcionamento das placas e 12 anos de funcionamento do inversor sem manutenções relevantes, pode-se inferir que o cliente terá, no mínimo, 8 anos de lucros com o abatimento das suas contas de energia pela geração da usina. Isto se mostra um ótimo modelo de negócio para investidores, além dos ganhos ambientais com a redução da geração de energia por fontes mais poluentes.

Finalmente, este trabalho tem como intuito também motivar e inspirar que mais alunos dos cursos de engenharia venham empregar o que é visto em sala de aula aplicados nos trabalhos ou demandas de campo. É muito satisfatório ver que todo esse trabalho realizado na Fazenda Morro Redondo teve grande êxito, tudo isso faz com que ganhemos mais experiência e contribuamos grandemente para a sustentabilidade do planeta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Atlas da eficiência energética – Brasil: 2024**. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Atlas-da-Eficiencia-Energetica---Brasil>. Acesso em: 28 abr. 2025.
2. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Caderno de Tecnologias de Geração 2023**. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 27 abr. 2025.
3. GREENER. **Estudo estratégico de geração distribuída: mercado fotovoltaico** – março de 2025. São Paulo: Greener, 2025.
4. SEBRAE. **Cadeia de valor da energia solar fotovoltaica no Brasil**. Organização dos Estados Ibero-Americanos para a Educação, a Ciência e a Cultura; Clean Energy Latin America. Brasília, DF: Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas, 2018. 362 p.
5. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 19 abr. 2012. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2025.
6. Canal Solar. **Publicada a norma brasileira de instalações fotovoltaicas**. Canal Solar, 17 fev. 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/publicada-a-norma-brasileira-de-instalacoes-fotovoltaicas/>. Acesso em: 28 abr. 2025.
7. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 16690:2019 – Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos – Requisitos de projeto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
8. BRASIL. **Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 7 jan. 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/L14300.htm. Acesso em: 27 abr. 2025.
9. BRASIL **Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 7 jan. 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/L14300.htm. Acesso em: 27 abr. 2025.
10. Portal Solar. **Painéis solares integrados à construção – BIPV**. Portal Solar, 2024. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/paineis-solares-integrados-a-construcao-bipv.html>. Acesso em: 28 abr. 2025.
11. PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio (org.). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL/Cresesb, 2014.
12. MARIANO, Juliana D'Angela; JUNIOR, Jair Urbanetz. **Energia solar fotovoltaica: princípios fundamentais**. Ponta Grossa: Atena Editora, 2022. ISBN 978-65-258-0075-2. DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.752221803>.
13. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>. Acesso em: 27 abr. 2025.

14. CEPEL – CRESESB. **Sundata**: base de dados de radiação solar e temperatura. Portal Cresesb. Rio de Janeiro: Cepel, 2025. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acesso em: 28 abr. 2025.
15. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 2 dez. 2015. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2025.
16. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html>. Acesso em: 28 abr. 2025.
17. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 5410: instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
18. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 10899:2013 – Energia solar fotovoltaica: terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
19. Neo Solar. **Tipos de placa solar**. Portal NeoSolar, 2024. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/placa-solar-fotovoltaica/tipos>. Acesso em: 28 abr. 2025.
20. AYRÃO, Vinicius. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: conceitos, aplicações e estudos de caso**. Primeira edição. ed. Rio de Janeiro: International Copper Association Brazil, 2018. 102 p. v. 1.
21. FAS Energia Solar. **Inversores e micro inversores**. Disponível em: <https://fasenergiasolar.com.br/inversores-e-micro-inversores/>. Acesso em: 28 abr. 2025.
22. Energia Total. **Inversor Solar Fronius Symo 20.0-3-M 20KW Trifásico 380V**. Disponível em: <https://www.energiatotal.com.br/inversor/on-grid/inversor-solar-fronius-symo-20-0-3-m-kw>. Acesso em: 28 abr. 2025.
23. SOLAREEDGE. **Otimizadores de potência: Série S**. Disponível em: <https://www.solaredge.com/br/produtos/residencial/otimizadores-de-potencia/serie-S>. Acesso em: 28 abr. 2025.
24. ROMAGNOLE Produtos Elétricos S.A. **Catálogo de estruturas para painéis fotovoltaicos**. Maringá: Romagnole, 2018. Disponível em: <https://www.romagnole.com.br>. Acesso em: 27 abr. 2025.
25. SCHNEIDER Electric Brasil Ltda. **Catálogo Easy9: a melhor escolha**. São Paulo: Schneider Electric, 2021. Disponível em: <https://www.se.com/br/pt/>. Acesso em: 27 abr. 2025.
26. THS Indústria e Comércio de Componentes Elétricos Ltda. **Catálogo de fusíveis gPV para sistemas fotovoltaicos**. São Paulo: THS, 2022. Disponível em: <https://ths.com.br/>. Acesso em: 27 abr. 2025.
27. SIBRATEC Indústria e Comércio de Materiais Elétricos Ltda. **Chave seccionadora sistema solar fotovoltaico SC100R-PM32R-4T**. Rio do Sul: Sibratec, 2022. Disponível em: <https://www.sibratec.ind.br>. Acesso em: 27 abr. 2025.
28. CLAMPER Indústria e Comércio S.A. **Clamper Front: dispositivo de proteção contra surtos**. Lagoa Santa: Clamper, 2015. Revisão 03. Disponível em: <https://www.clamper.com.br>. Acesso em: 27 abr. 2025.

29. FREIRE, Paulo Edmundo. **Sistema de aterramento de uma usina solar fotovoltaica.** Canal Solar, 2023. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/sistema-de-aterramento-de-uma-usina-solar-fotovoltaica/>. Acesso em: 28 abr. 2025.
30. SANTOS, Sérgio Roberto. **Proteção contra descargas atmosféricas em usinas fotovoltaicas.** Canal Solar, 18 ago. 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/protecao-contradescargas-atmosfericas-em-usinas-fotovoltaicas/>. Acesso em: 28 abr. 2025.
31. BELENERGY - Disponível em: <https://belenus.com.br/produto/3/energia%20solar/componentes%20el%C3%A9tricos/null/null/2466/Componentes%20El%C3%A9tricos/72/SBCL-3E3S-1000V>. Acesso em: 27/04/2025)
32. CEPEL - CRESESB. **Banco de baterias.** Disponível em: https://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=cse_banco_baterias. Acesso em: 28 abr. 2025.